

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dominik Ešegović**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Igor Karšaj

Student:

Dominik Ešegović

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima izv. prof. dr. sc. Igoru Karšaju i dr. sc. Anti Bakiću na pruženoj pomoći i savjetima tijekom studija i izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je omogućila ovaj studij i pružala mi potporu tijekom cijelog mog školovanja.

Zahvaljujem se i svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, kao i svim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli u toku studiranja i u izradi ovog rada.

Dominik Ešegović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Dominik Ešegović

Mat. br.: 0035183708

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Proračun pneumatskog prsta za zaključavanje manipulatora unutar  
cijevi parogeneratora**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Stress analysis of pneumatically actuated grippers on manipulator  
applied throughout the PWR inspection**

Opis zadatka:

Mobilni manipulator koji se kreće po cijevnoj stijeni parogeneratora dio je sustava za nerazorno ispitivanje stijenki cijevnog snopa. Manipulator se samostalno drži za cijevnu stijenu pomoću četiri posebno dizajnirana prsta (gripera) koji se uvlače u unutrašnjost proizvoljne cijevi te se pneumatskim aktuatorom šire odnosno otpuštaju u skladu s naredbama kontrolnog sustava.

Parogeneratori su sastavni dio primarnog kruga nuklearnih elektrana i zbog toga svaka aktivnost na njima podliježe strogoj kontroli nacionalnih regulatornih tijela. Prema preporuci jednog od njih, potrebno je na manipulatoru izmijeniti prst gripera, koji se do sada sastojao od mehanizma s tri elementa, sa samo jednim elementom.

Predmet ovog diplomskog rada je dizajn i proračun takvog elastičnog elementa koji će osiguravati kvalitetno zaključavanje unutar cijevi, ali isto tako i svojim materijalnim svojstvima i oblikom garantirati otpuštanje nakon povlačenja pneumatskog klipa. Predviđeno je da predmetni element pouzdano radi do 200 000 ciklusa. Kod numeričkog proračuna potrebno je koristiti modele velikih deformacija. Griper se treba zaključavati u cijevi vanjskog promjer 22,23 mm i unutrašnjeg promjera  $d=19,68 \pm 0,15$  mm.

Dodatne informacije dostupne su prema potrebi.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

Predviđeni datumi obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Igor Karšaj dr.sc. Ante Bakić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. O nuklearnim elektranama .....	1
1.2. Princip rada i dijelovi nuklearne elektrane .....	2
1.3. Parogeneratori nuklearnih elektrana .....	4
1.4. Metode nerazornih ispitivanja u nuklearnim elektranama .....	8
1.4.1. Metoda ispitivanja ultrazvučnim valovima.....	8
1.4.2. Metoda ispitivanja vrtložnim strujama - eddy current .....	9
1.5. Uređaji za ispitivanje parogeneratora nuklearnih elektrana.....	9
1.5.1. Starije generacije robota za ispitivanje parogeneratora .....	10
1.5.2. Novije generacije robota za ispitivanje parogeneratora.....	10
1.5.2.1. ZR 100, Zetec.....	11
1.5.2.2. Pegasys, Westinghouse .....	11
1.5.2.3. Forerunner, Inetec .....	12
2. FORERUNNER I OPIS PROBLEMA.....	13
2.1. Forerunner .....	13
2.2. Mehanizam prihvata na cijevnu stijenu - pneumatski griperi .....	14
2.3. Postojeća izvedba i princip rada prsta gripera .....	16
2.4. Opis problema .....	18
3. OSNOVE NELINEARNE ANALIZE KONSTRUKCIJA I MODELIRANJA KONTAKTA .....	19
3.1. Nelinearna analiza konstrukcija .....	19
3.1.1. O nelinearnoj formulaciji .....	20
3.1.2. Newton - Raphsonov iteracijski postupak .....	23
3.1.2.1. Modificirani Newton - Raphsonov postupak.....	24
3.1.3. Primjena konačnih elemenata .....	25
3.2. Modeliranje kontakta u Abaqusu .....	26
3.2.1. Formulacija kontakta .....	26
3.2.1.1. Node to surface diskretizacija kontakta .....	27
3.2.1.2. Surface to surface diskretizacija kontakta.....	28
3.2.2. Metode definiranja „hard“ kontakta.....	28
4. DEFINIRANJE ANALIZE U ABAQUSU I VERIFIKACIJA NUMERIČKOG MODELA .....	30
4.1. Definiranje geometrijske nelinearnosti .....	30
4.2. Definiranje kontakta.....	30
4.3. O korištenom konačnom elementu .....	31

4.4.	Verifikacija numeričkog modela.....	32
4.4.1.	Prvi slučaj - gibanje klina i bloka.....	33
4.4.2.	Drugi slučaj - stanje granične ravnoteže .....	36
5.	DIZAJN I PRORAČUN NOVOG PRSTA GRIPERA .....	40
5.1.	Opis zadatka.....	40
5.2.	Prikaz novog dizajna.....	41
5.3.	Razvoj novog prsta gripera .....	42
5.3.1.	Prva verzija novog prsta.....	42
5.3.1.1.	Geometrija prsta u Abaqusu.....	43
5.3.1.2.	Svojstva materijala.....	43
5.3.1.3.	Definiranje kontakta.....	44
5.3.1.4.	Rubni uvjeti.....	44
5.3.1.5.	Mreža konačnih elemenata .....	45
5.3.1.6.	Prikaz rezultata.....	46
5.3.2.	Druga verzija novog prsta .....	47
5.3.3.	Konačna verzija novog prsta.....	49
5.3.3.1.	Geometrija prsta u Abaqusu.....	50
5.3.3.2.	Rubni uvjeti.....	51
5.3.3.3.	Mreža konačnih elemenata .....	53
5.3.3.4.	Prikaz rezultata.....	54
6.	TESTIRANJE NOVOG PRSTA GRIPERA .....	59
6.1.	Konstrukcija okvira za ispitivanje gripera .....	60
6.2.	Rezultati ispitivanja.....	61
7.	ZAKLJUČAK.....	62
	LITERATURA.....	64

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Nuklearna elektrana Grafenrheinfeld, Njemačka [3] .....	2
Slika 2.	Shematski prikaz nuklearnog postrojenja s tlačnim reaktorom (PWR) [4]: 1 - zaštitna zgrada, 2 - rashladni toranj, 3 - gorivni štapovi nuklearnog goriva, 4 - kontrolni štapovi, 5 - tlačnik, 6 - parogenerator, 7 - zaštitna reaktorska posuda, 8 - parna turbina, 9 - električni generator, 10 - transformator i spoj na elektroenergetski sustav, 11 - kondenzatorska rashladna voda, 12 - parovod, 13 - izmjenjivač topline, 14 - kondenzator rashladnog tornja, 15 - vodena para, 16 - cirkulacijska pumpa, 17 - pumpa napojne vode, 18 - primarni krug, 19 - sekundarni krug .....	3
Slika 3.	Shematski prikaz nuklearnog postrojenja s kipućim reaktorom (BWR) [5]: 1 - reaktorska posuda, 2 - gorivni štapovi nuklearnog goriva, 3 - kontrolni štapovi, 4 - cirkulacijska pumpa vode, 5 - motori kontrolnih štapova, 6 - pregrijana para, 7 - napojna voda, 8 - visokotlačna parna turbina, 9 - niskotlačna parna turbina, 10 - električni generator, 11 - pobuda generatora, 12 - kondenzator, 13 - rashladna voda, 14 - predgrijač, 15 - pumpa napojne vode, 16 - pumpa rashladne vode, 17 - betonsko kućište, 18 - spoj na elektroenergetski sustav .....	4
Slika 4.	Raspored parogeneratora unutar PWR elektrane [6] .....	5
Slika 5.	Raspored parogeneratora unutar VVER elektrane [7] .....	5
Slika 6.	Shematski prikaz parogeneratora PWR tipa nuklearnih elektrana [8] .....	6
Slika 7.	Cijevi parogeneratora spojene s cijevnom stijenom [9] .....	7
Slika 8.	Spoj cijevi s cijevnom stijenom [10] .....	7
Slika 9.	Ultrazvučna sonda za ispitivanje ventila tlačnika nuklearnog reaktora [11] .....	8
Slika 10.	Eddy current sonda za ispitivanje cijevi parogeneratora nuklearnih elektrana [11] .....	9
Slika 11.	Ranger, Areva [12] .....	10
Slika 12.	ZR 100, Zetec [13] .....	11
Slika 13.	Pegasys, Westinghouse [14] .....	11
Slika 14.	Forerunner, Inetec [11] .....	13
Slika 15.	Presjek gripera .....	15
Slika 16.	Postojeća izvedba prsta gripera .....	16
Slika 17.	Spoj cijevi i cijevne stijene s označenom zonom valjanja [15] .....	17
Slika 18.	Lineani i nelinearni odziv konstrukcije .....	19
Slika 19.	Prikaz osnovnog i bliskog stanja kod nelinearnog odziva konstrukcije [16] .....	21
Slika 20.	Newton - Raphsonov iteracijski postupak [17] .....	23
Slika 22.	Modificirani Newton-Raphson iteracijski postupak [17] .....	25
Slika 23.	<i>Node to surface</i> diskretizacija kontakta [19] .....	27
Slika 24.	Mogućnost prodiranja čvorova kod <i>Node to surface</i> diskretizacije [20] .....	28
Slika 25.	<i>Surface to surface</i> diskretizacija kontakta [20] .....	28
Slika 26.	C3D20R konačni element [21] .....	31
Slika 27.	Verifikacijski primjer kontakta u Abaqusu .....	32
Slika 28.	Odabrane dimenzije klina i bloka .....	33
Slika 29.	Početni i krajnji položaj sustava .....	33
Slika 30.	Model u Abaqusu s označenim površinama klina i bloka u kontaktu .....	34
Slika 31.	Rubni uvjeti za verifikacijski primjer - slučaj gibanja klina i bloka .....	35
Slika 32.	Mreža konačnih elemenata za verifikacijski primjer (357 C3D20R elemenata) ..	35
Slika 33.	Pomaci klina i bloka u smjeru osi X (lijevo) i u smjeru osi Y (desno) u mm .....	36

Slika 34.	Klin i blok s ucrtanim opterećenjem i reakcijama veza .....	37
Slika 35.	Rubni uvjeti za verifikacijski primjer - slučaj granične ravnoteže.....	38
Slika 36.	Skica novog dizajna prsta i trna gripera .....	41
Slika 37.	Geometrija prsta i trna gripera (prva verzija nove izvedbe).....	42
Slika 38.	Geometrija prsta u Abaqusu (prva verzija nove izvedbe) .....	43
Slika 39.	Kontakt prsta i trna gripera.....	44
Slika 40.	Rubni uvjeti simetrije trna i prsta (prva verzija nove izvedbe) .....	45
Slika 41.	Mreža konačnih elemenata prve verzije novog prsta (18192 C3D20R elementa)	46
Slika 42.	Deformirani oblik prsta s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa (prva verzija nove izvedbe) .....	47
Slika 43.	Geometrija prsta i trna gripera (druga verzija nove izvedbe).....	48
Slika 44.	Različite izvedbe spoja baze i vrata prsta.....	49
Slika 45.	Prikaz koncentracije naprezanja za različite debljine ligamenta baze prsta, MPa	49
Slika 46.	Geometrija prsta i trna gripera (konačna verzija nove izvedbe) .....	50
Slika 47.	Geometrija prsta u Abaqusu (konačna verzija nove izvedbe).....	51
Slika 48.	Rubni uvjeti simetrije trna i prsta (konačna verzija nove izvedbe).....	52
Slika 49.	Uklještenje baze prsta.....	52
Slika 50.	Mreža konačnih elemenata konačne verzije novog prsta (14773 C3D20R elementa) .....	53
Slika 51.	Deformirani oblik prsta s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa za analizu bez cijevi (konačna verzija nove izvedbe) .....	54
Slika 52.	Naprezanja prema von Misesu u MPa na kritičnom presjeku prsta (analiza bez cijevi).....	55
Slika 53.	Detalj prsta s prikazanim naprezanjima prema von Misesu u MPa (analiza bez cijevi).....	55
Slika 54.	Deformirani oblik prsta s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa za analizu sa cijevi (konačna verzija nove izvedbe) .....	56
Slika 55.	Detalj prsta s prikazanim naprezanjima prema von Misesu u MPa (analiza sa cijevi).....	57
Slika 56.	Prikaz područja koncentracije naprezanja .....	57
Slika 57.	Cijev s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa uslijed pritiska prsta u procesu zaključavanja za cijev .....	58
Slika 58.	Izrađeni set prstiju gripera za Forerunner.....	59
Slika 59.	Montaža prsta na griper .....	59
Slika 60.	Prikaz gripera s novim prstom u okviru za testiranje .....	60
Slika 61.	Forerunner sa zaštitnim kapticama na prstima gripera.....	61



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Iznosi reakcijskih sila za verifikacijski primjer dobiveni analitički i numerički u Abaqusu.....	38
Tablica 2. Svojstva čelika 50CrV4 i X2CrNiMo18-14-3.....	44

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
$\mathbf{D}$	Matrica elastičnosti
$\mathbf{D}_{eL}$	Linearni diferencijalni operator uvjeta ravnoteže
$\mathbf{D}_{eN}$	Nelinearni diferencijalni operator uvjeta ravnoteže
$\mathbf{D}_{kL}$	Linearni kinematički diferencijalni operator
$\mathbf{D}_{kN}$	Nelinearni kinematički diferencijalni operator
$F$	Sila
$F_N$	Normalna sila
$\mathbf{G}$	Nelinearna vektorska funkcija unutarnjih sila
$G$	Težina bloka
$\mathbf{K}$	Linearna matrica krutosti
$\mathbf{K}_T$	Tangencijalna matrica krutosti
$p$	Tlak
$\mathbf{q}$	Vektor volumenskih sila
$\mathbf{q}_b$	Vektor površinskog opterećenja
$\bar{\mathbf{q}}$	Vektor volumenskih sila osnovnog stanja
$\bar{\mathbf{q}}_b$	Vektor površinskog opterećenja osnovnog stanja
$\Delta \mathbf{q}$	Vektor inkrementalnih volumenskih sila
$\Delta \mathbf{q}_b$	Vektor inkrementalnog površinskog opterećenja
$\mathbf{R}$	Vektor čvornih sila
$\mathbf{R}_i$	Vektor unutarnjih sila
$R_i$	Vektor vanjskog opterećenja bliskog stanja
$\mathbf{R}_{qL}$	Linearni operator površinskog opterećenja
$\mathbf{R}_{qN}$	Nelinearni operator površinskog opterećenja
$\mathbf{R}_u$	Operator rubnih pomaka
$\bar{R}_i, \bar{\mathbf{R}}$	Vektor vanjskog opterećenja osnovnog stanja
$\Delta \mathbf{R}$	Vektor inkrementalnog opterećenja
$r$	Vektor neuravnoteženja
$U1, U2, U3$	Pomaci u smjeru koordinatnih osi u Abaqusu
$UR1, UR2, UR3$	Rotacije oko koordinatnih osi u Abaqusu
$\mathbf{u}$	Vektor pomaka
$\mathbf{u}_s$	Vektor pomaka na rubu tijela
$\bar{\mathbf{u}}$	Vektor pomaka osnovnog stanja
$\Delta \mathbf{u}$	Vektor inkrementalnih pomaka
$\mathbf{V}$	Vektor čvornih pomaka
$V_j$	Vektor pomaka bliskog stanja

---

$\bar{V}_j, \bar{\mathbf{V}}$	Vektor pomaka osnovnog stanja
$\Delta \mathbf{V}$	Vektor inkrementalnih pomaka
$\mathbf{v}$	Vektor čvornih pomaka
$\bar{\mathbf{v}}$	Vektor čvornih pomaka osnovnog stanja
$\Delta \mathbf{v}$	Vektor inkrementalnih čvornih pomaka
$X, Y, Z$	Koordinatne osi
$\delta$	Pomak
$\bar{\delta}$	Specijalna prva varijacija
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Tenzor deformacije
$\mu$	Faktor trenja
$\boldsymbol{\sigma}$	Tenzor naprezanja

## SAŽETAK

U ovom radu proveden je dizajn i numerički proračun elementa manipulatora za ispitivanje dijelova nuklearnih elektrana. Tvrtka Inetec - Institut za Nuklearnu Tehnologiju razvila je mobilni manipulator Forerunner za ispitivanje cijevi parogenerators PWR tipova elektrana. Manipulator se samostalno drži i giba po cijevnoj stijeni parogenerators pomoću četiri posebno dizajnirana gripera. Pri tome elastični dio gripera - prst gripera, ulazi u cijev te se pomoću pneumatskog aktuatora radijalno širi i zaključava unutar cijevi.

Prilikom ispitivanja dijelova nuklearnih elektrana poželjno je da uređaji za ispitivanje budu što jednostavniji i da se sastoje od što manjeg broja komponenti. U skladu s tim proveden je razvoj nove verzije prsta gripera, koji se do sada sastojao od mehanizma s tri elementa, sa samo jednim elementom.

U uvodnom dijelu rada ukratko su prikazani tipovi nuklearnih postrojenja i njihovi relevantni dijelovi. Prikazane su osnovne metode nerazornih ispitivanja u nuklearnoj industriji i postojeće izvedbe robota koje koriste te metode prilikom ispitivanja dijelova elektrana. Opisan je princip rada Forerunnera i mehanizma gripera.

U posebnom poglavlju pokazani su osnovni teorijski principi potrebni za razumijevanje i definiranje numeričke analize koja uključuje velike deformacije i kontakt. Prikazane su osnove nelinearne analize i načini definiranja kontakta u programskom paketu Abaqus.

Nakon verifikacije numeričkog modela na jednostavnom primjeru kontakta dvaju tijela, prikazan je tijek razvoja novog prsta gripera s pripadnim numeričkim proračunom.

Na temelju rezultata numeričke analize nova verzija prsta gripera izrađena je i testirana u laboratoriju tvrtke Inetec gdje je pokazano da novi prst zadovoljava sve potrebne zahtjeve i pouzdano radi u predviđenom broju ciklusa zaključavanja.

Ključne riječi: numerička analiza, modeliranje kontakta, nelinearna analiza, ispitivanje nuklearnih elektrana

## SUMMARY

The thesis presents the design process and numerical analysis of a manipulator component used in nuclear power plant inspections. Inetec - Institute for Nuclear Technology designed the Forerunner, a manipulator used for steam generator inspections in PWR nuclear power plants. The Forerunner uses four specifically designed grippers to lock his position on the steam generator tube sheet. In the gripping process, an elastic component of the gripper, called the gripper finger, is pushed into the tube. Through a pneumatic actuator, the finger then expands and locks to the tube.

In the nuclear industry it is recommended to use equipment that consists of as few components as possible. Since the Forerunner gripper finger used a mechanism with three components, a new gripper finger with only one component was designed.

In the introduction of the thesis, a short overview of nuclear power plants was provided. Basic nondestructive testing methods and current robotic system used in nuclear power plant inspections were shown. The inspection process was explained on the Forerunner.

One chapter was dedicated to explaining basic theory concepts used in numerical analysis of problems that include large strains and contacts. The basics of nonlinear formulation and contact modeling in the software suite Abaqus FEA was provided.

After presenting the used modeling techniques on a simple verification problem, an overview of the design process of the new gripper finger was given. The design process was accompanied with the appropriate numerical analysis using the finite element method.

Based on the results of the numerical analysis, the new gripper finger was manufactured and tested in Inetecs laboratory, where it was shown that the new design of the gripper finger meets all the necessary demands and reliably works within the expected number of locking cycles.

Key words: numerical analysis, contact modeling, nonlinear analysis, nuclear power plant inspections

## 1. UVOD

Električna energija postala je temelj moderne civilizacije, stoga se velika važnost pridodaje održavanju i razvoju stabilnog elektroenergetskog sustava. Elektrane kao centar tog sustava predstavljaju mjesto proizvodnje električne energije, odnosno mjesto pretvorbe drugih oblika energije u električnu. Već prema tome koji se oblik energije koristi kao izvor, elektrane možemo podijeliti na one koje koriste konvencionalne ili klasične izvore kao što su energija fosilnih goriva, potencijalna energija vode i nuklearna energija, te na one koje koriste nekonvencionalne ili alternativne izvore kao što su kinetička energija vjetra, potencijalna i toplinska energija mora, sunčevo zračenje i energija iz biogoriva. Iako obnovljivi izvori dobivaju sve više na značenju, danas su još uvijek najzastupljeniji konvencionalni izvori. Termoelektrane, u koje možemo ubrojiti i nuklearne elektrane, postale su pouzdani i ekonomski prihvatljivi tehnički sustavi. Prednost je nuklearnih elektrana u odnosu na ostale termoelektrane izostanak velikih količina emisija stakleničkih plinova, dok je problem zbrinjavanja radioaktivnog otpada nuklearnih elektrana riješen nizom provjerenih tehnoloških postupaka. Zbog strogih sigurnosnih zahtjeva koje nuklearne elektrane moraju zadovoljiti, potrebno je osigurati efektivan način inspekcije i remonta glavnih dijelova postrojenja i to tako da se minimalizira ljudsko izlaganje zračenju. To se provodi uvođenjem mobilnih robota za inspekciju dijelova elektrana. Unaprjeđenje takvih robotskih sustava može doprinijeti smanjenju rizika od kvara postrojenja i pomoći u očuvanju od štetnog utjecaja na čovjeka i okoliš.

### 1.1. O nuklearnim elektranama

Nuklearne elektrane su termoelektrane u kojima je izvor toplinske energije nuklearni reaktor. Kao što je uobičajeno i u ostalim termoelektranama, dobivena toplina koristi se za proizvodnju pare koja pokreće parnu turbinu spojenu na električni generator. Prema [1], trenutno je u svijetu aktivno 450 nuklearnih reaktora u 31 državi, s dodatnih 60 reaktora u izgradnji. Prema podacima iz 2015. godine, u nuklearnim elektranama proizvelo se približno 19% ukupno proizvedene električne energije u svijetu [2]. Primjer nuklearne elektrane prikazan je na slici 1., gdje je reaktor smješten u središnjoj sferičnoj zaštitnoj zgradi (*Containment building*), a s lijeve i desne strane mogu se vidjeti rashladni tornjevi (*cooling tower*) koji su uobičajeni rashladni uređaji u svim termoelektranama.



**Slika 1. Nuklearna elektrana Grafenrheinfeld, Njemačka [3]**

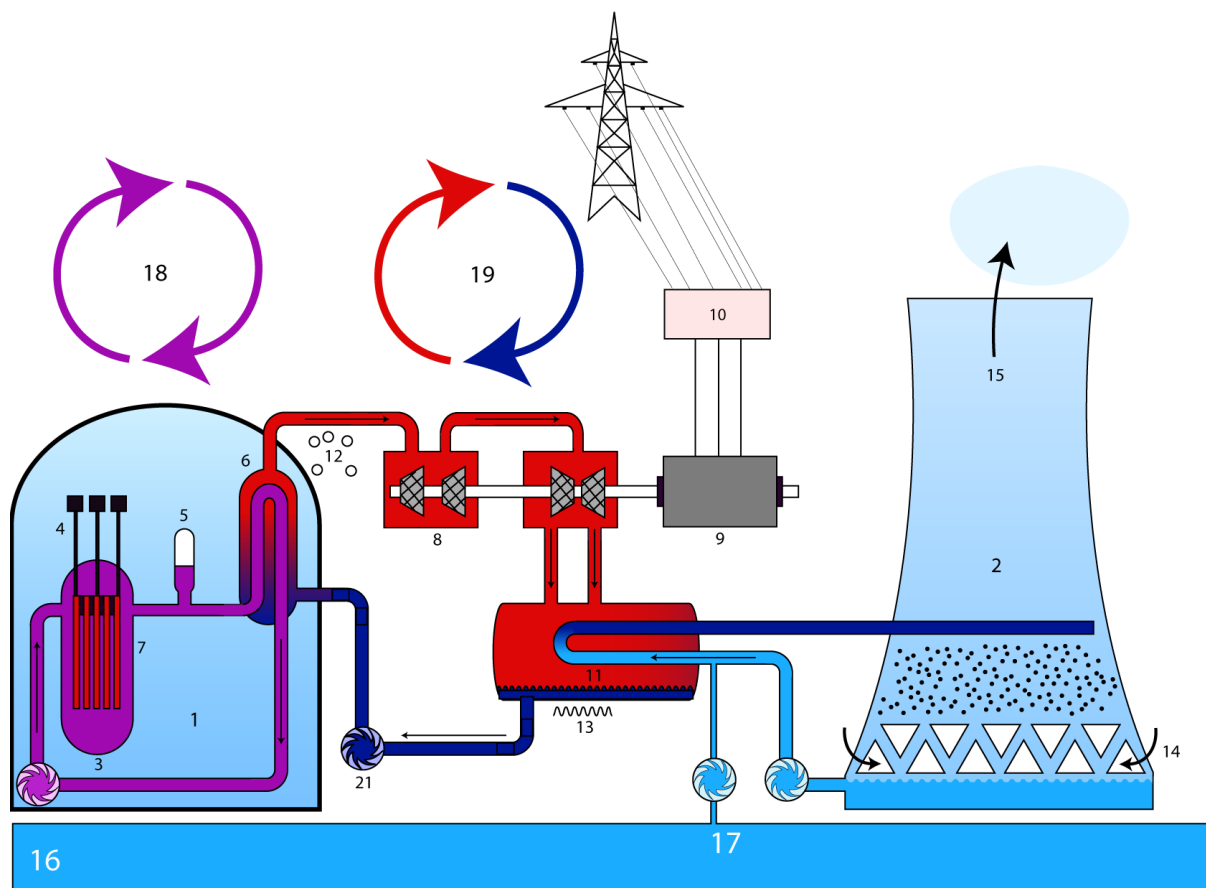
## **1.2. Princip rada i dijelovi nuklearne elektrane**

U nuklearnom se reaktoru pod strogo kontroliranim uvjetima odvija proces nuklearne fisije pri čemu se oslobađa toplina koja se predaje rashladnom mediju. Rashladni medij najčešće je voda, no može biti i plin ili u nekim slučajevima tekući metal, što ovisi o tipu reaktora. Dva najčešće korištena tipa reaktora su:

- Tlačni reaktor ili reaktor s vodom pod tlakom (*Pressurized Water Reactor* - PWR)
- Kipući reaktor ili reaktor s ključajućom vodom (*Boiling Water Reactor* - BWR)

U slučaju postrojenja s tlačnim reaktorom, toplina koja se oslobodi uslijed nuklearne reakcije predaje se vodi koju nazivamo voda primarnog kruga. Voda primarnog kruga odvodi se preko cjevovoda iz reaktora u veliki izmjenjivač topline - parogenerator. U parogeneratoru voda primarnog kruga predaje toplinu vodi sekundarnog kruga, a zatim se pumpama vraća u reaktor i tako zatvara primarni krug. Voda sekundarnog kruga je dakle poseban tok vode koji u parogeneratoru nastrujava na vanjske stijenke cijevi kroz koje teče voda primarnog kruga. Pri tome voda sekundarnog kruga isparava te se odvodi do parne turbine gdje se vrši konverzija toplinske energije sadržane u pari najprije u mehaničku, a zatim u električnu energiju. Para se na izlazu iz turbine odvodi u kondenzator gdje se hladi i kondenzira, a zatim

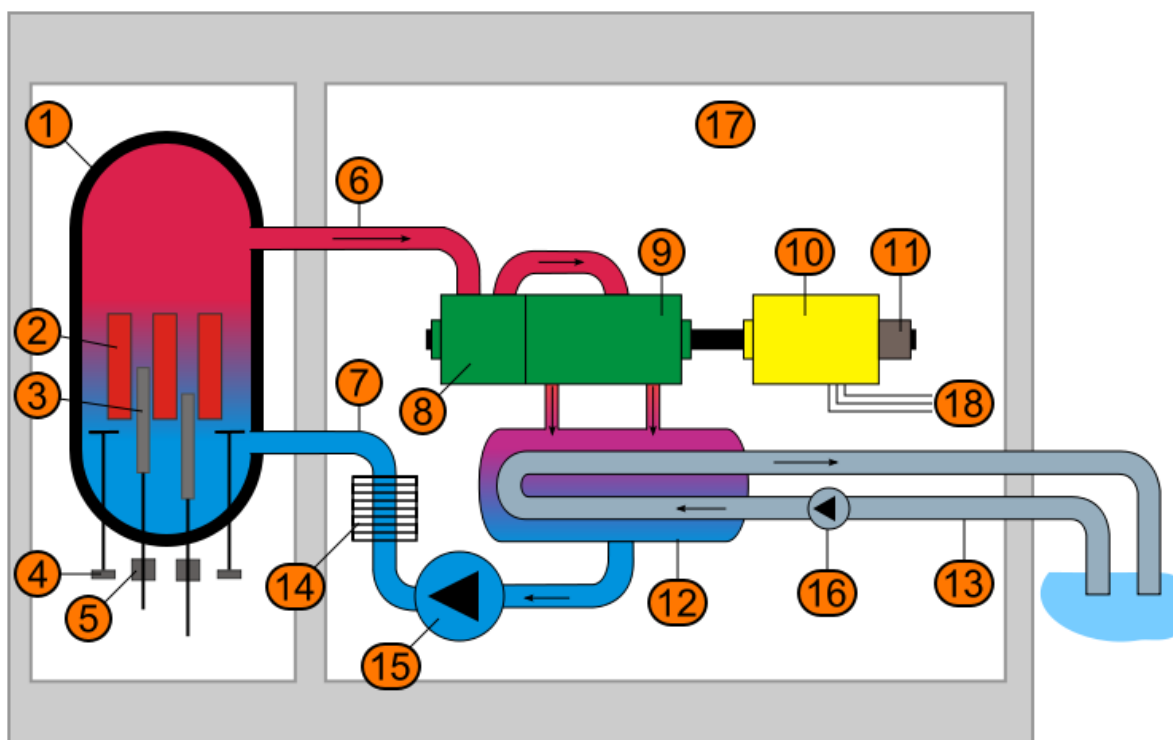
se pomoću pumpi vraća u parogenerator zatvarajući na taj način sekundarni krug. Shema nuklearnog postrojenja s tlačnim reaktorom prikazana je na slici 2.



**Slika 2.** Shematski prikaz nuklearnog postrojenja s tlačnim reaktorom (PWR) [4]: 1 - zaštitna zgrada, 2 - rashladni toranj, 3 - gorivni štapovi nuklearnog goriva, 4 - kontrolni štapovi, 5 - tlačnik, 6 - parogenerator, 7 - zaštitna reaktorska posuda, 8 - parna turbina, 9 - električni generator, 10 - transformator i spoj na elektroenergetski sustav, 11 - kondenzatorska rashladna voda, 12 - parovod, 13 - izmjenjivač topline, 14 - kondenzator rashladnog tornja, 15 - vodena para, 16 - cirkulacijska pumpa, 17 - pumpa napojne vode, 18 - primarni krug, 19 - sekundarni krug

Za razliku od opisanih postrojenja s tlačnim reaktorom u kojima reaktor grije vodu primarnog kruga, a tako zagrijana voda predaje toplinu sekundarnom krugu u parogeneratoru nakon čega voda sekundarnog kruga isparava, postrojenja koja koriste kipući reaktor ili reaktor s ključajućom vodom (BWR) rade na nižim radnim tlakovima što omogućava ključanje vode unutar reaktorske posude. Kako para nastaje izravno u nuklearnom reaktoru, sekundarni krug i parogenerator nisu potrebni u ovoj izvedbi nuklearnog postrojenja. Shematski prikaz postrojenja s kipućim reaktorom dan je na slici 3.





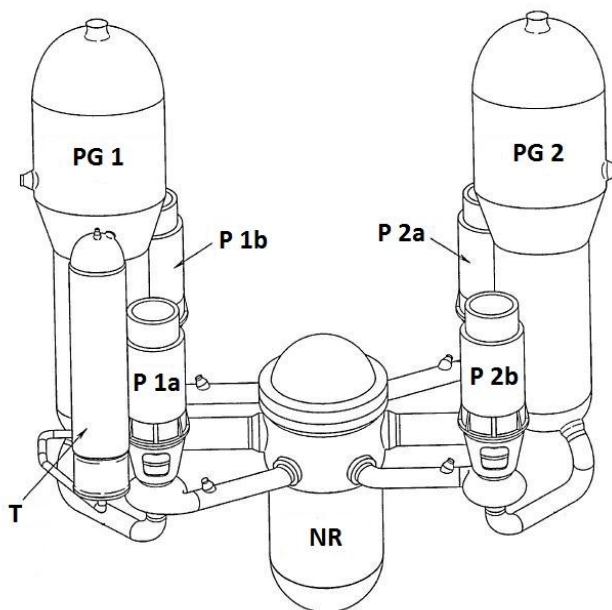
**Slika 3.** Shematski prikaz nuklearnog postrojenja s kipućim reaktorom (BWR) [5]: 1 - reaktorska posuda, 2 - gorivni štapovi nuklearnog goriva, 3 - kontrolni štapovi, 4 - cirkulacijska pumpa vode, 5 - motori kontrolnih štapova, 6 - pregrijana para, 7 - napojna voda, 8 - visokotlačna parna turbina, 9 - niskotlačna parna turbina, 10 - električni generator, 11 - pobuda generatora, 12 - kondenzator, 13 - rashladna voda, 14 - predgrijač, 15 - pumpa napojne vode, 16 - pumpa rashladne vode, 17 - betonsko kućište, 18 - spoj na elektroenergetski sustav

Tlačni reaktori (PWR), kao i kipući reaktori (BWR), imaju svoje prednosti i nedostatke te je zastupljenost tipa reaktora u pojedinoj regiji ovisna između ostalog i o tradiciji i prijašnjem iskustvu. Tlačni reaktori ipak su najrašireniji tipovi reaktora u svijetu i čine većinu nuklearnih postrojenja u Europi i SAD-u. Kao što je prikazano na slici 2., takvi tipovi nuklearnih elektrana za proizvodnju pare koriste parogenerator.

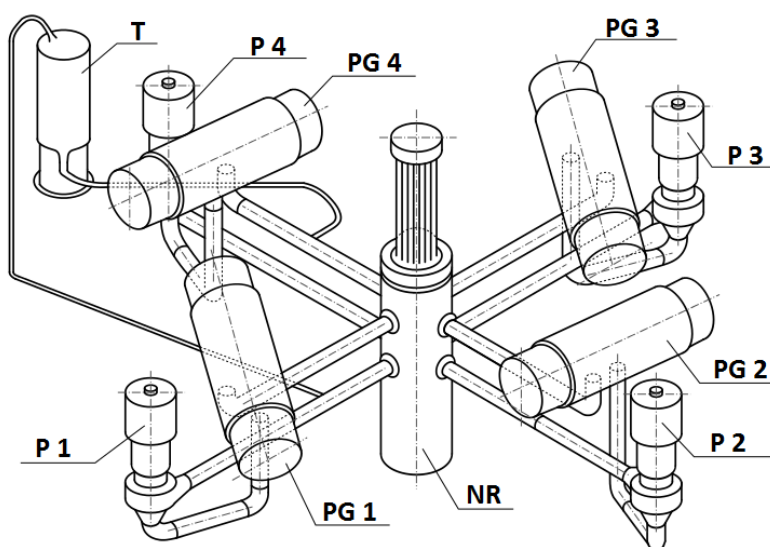
### 1.3. Parogeneratori nuklearnih elektrana

Parogeneratori su sastavni dijelovi svih nuklearnih elektrana s tlačnim reaktorom. Pod pojmom tlačni reaktor (PWR) obično se podrazumijeva izvedba tlačnog reaktora koja je uobičajena u zapadnim zemljama (PWR u užem smislu). U takvoj izvedbi cijevi unutar parogeneratora položene su vertikalno pa je i sam parogenerator u vertikalnom položaju unutar elektrane. Osim takve izvedbe, postoji i serija tlačnih reaktora koja se prvotno počela

graditi u bivšem Sovjetskom Savezu pod nazivom VVER (od ruskog: *Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor*; *Water-Water Power Reactor*). Takva izvedba reaktora uobičajena je u Rusiji, a prisutna je i u drugim zemljama. Parogeneratori kod VVER tipa elektrana položeni su horizontalno. Na slikama 4. i 5. prikazan je raspored parogeneratorsa u PWR elektrani (slika 4.) i u VVER elektrani (slika 5.). Na slikama su korištene oznake PG za parogenerator, P za pumpu, T za tlačnik i NR za nuklearni reaktor.



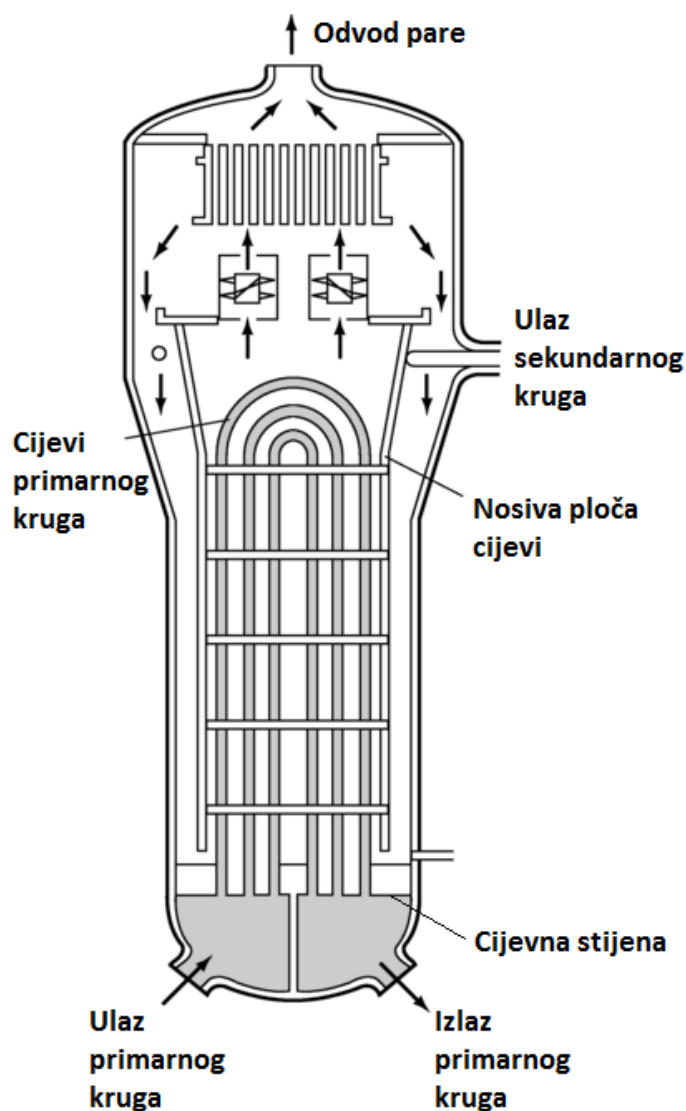
**Slika 4. Raspored parogeneratorsa unutar PWR elektrane [6]**



**Slika 5. Raspored parogeneratorsa unutar VVER elektrane [7]**

Na slikama se vidi da u nuklearnoj elektrani može biti instalirano više parogeneratorsa, obično dva do četiri po reaktoru.

Parogeneratori nuklearnih elektrana dosežu visinu od 20 metara i masu od nekoliko stotina tona. Jedan parogenerator može sadržavati od 3000 do 16000 cijevi kroz koje prolazi voda primarnog kruga. Zbog toga cijevi moraju biti otporne na visoke temperature, radijaciju i koroziju te se izrađuju iz posebnih superlegura. Između cijevi primarnog kruga struji voda sekundarnog kruga koja isparava te se odvodi do parne turbine. Shematski prikaz parogeneratora PWR tipa elektrana prikazan je na slici 6.

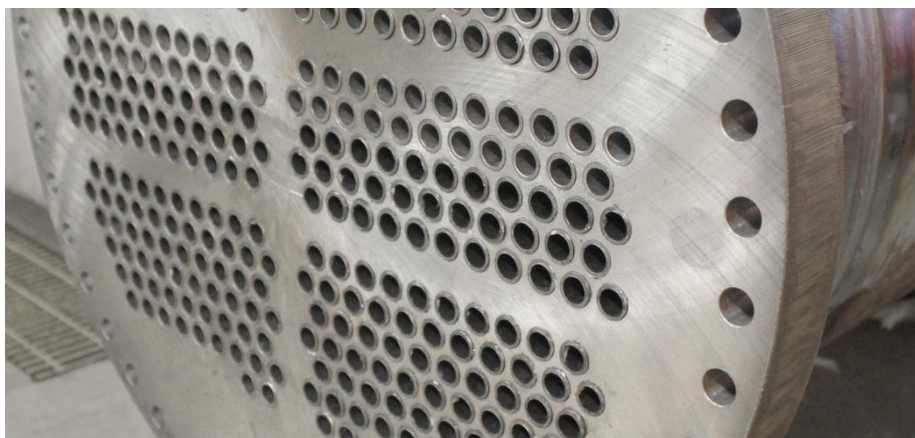


**Slika 6.** Shematski prikaz parogeneratora PWR tipa nuklearnih elektrana [8]

Cijevi primarnog kruga na krajevima su vezane za cijevnu stijenu ili *tube sheet*. Cijevna stijena je perforirana kružna ploča sa specifičnim uzorkom kružnih otvora koji odgovara rasporedu cijevi unutar parogeneratora. Cijevna stijena dakle služi kao prihvat cijevi, a također odvaja vodu primarnog kruga od vode sekundarnog kruga. Na slici 7. prikazane su cijevi primarnog kruga spojene s cijevnom stijenom, a detaljniji prikaz spoja cijevi i cijevne stijene može se vidjeti na slici 8.



**Slika 7. Cijevi parogeneratorske spojene s cijevnom stijenom [9]**



**Slika 8. Spoj cijevi s cijevnom stijenom [10]**

Cijevi parogeneratorske podliježu redovitim inspekcijama koje se provode pomoću za to predviđenih uređaja, odnosno robota. Prilikom ispitivanja parogenerator izlazi iz pogona. Kroz jedan od otvora primarnog kruga (slika 6.) potrebno je dovesti robota za ispitivanje do cijevne stijene. Na način koji ovisi o izvedbi robota tada se provodi ispitivanje cijevi jednom od nerazornih metoda ispitivanja.

#### 1.4. Metode nerazornih ispitivanja u nuklearnim elektranama

Nerazorne metode ispitivanja (*Nondestructive testing* - NDT) predstavljaju skup metoda koje koriste određene fizikalne principe za utvrđivanje svojstava te otkrivanja nepravilnosti materijala, a da se pri tome ne utječe na funkcionalnost materijala koji se ispituje. Najčešće korištene metode kod ispitivanja nuklearnih elektrana su ultrazvučno ispitivanje i ispitivanje vrtložnim strujama (*eddy current testing*).

##### 1.4.1. Metoda ispitivanja ultrazvučnim valovima

Pod ultrazvukom podrazumijevamo akustične poremećaje frekvencije iznad 20 000 Hz. Metode ispitivanja ultrazvučnim valovima (UZ valovima) temelje se na svojstvu ultrazvuka da se širi kroz sredstvo, pri čemu svako sredstvo ima određena akustična svojstva koja utječu na parametre širenja UZ vala. Pri nailasku UZ vala na granicu dvaju sredstava događaju se pojave refleksije, transmisije, konverzije i apsorpcije UZ vala. Što su sredstva akustički različitija, ultrazvuk će se više reflektirati. Na taj način mogu se primjerice detektirati pukotine u metalima, gdje ispitivani metal predstavlja osnovno sredstvo kroz koje val prolazi, a pukotina predstavlja područje različitih akustičnih svojstava gdje se događa pojava refleksije vala. Kao izvor UZ vala koriste se ultrazvučne sonde koje mogu biti različitih izvedbi, ovisno o konstrukciji koja se ispituje. Primjer izvedbe ultrazvučne sonde za ispitivanje ventila tlačnika nuklearnog reaktora prikazan je na slici 9.



Slika 9. Ultrazvučna sonda za ispitivanje ventila tlačnika nuklearnog reaktora [11]

#### **1.4.2. Metoda ispitivanja vrtložnim strujama - eddy current**

Ispitivanje vrtložnim strujama ili *eddy current testing* (ECT) jedna je od mnogih elektromagnetskih metoda nerazornih ispitivanja koja koristi elektromagnetsku indukciju za detekciju nepravilnosti kod vodljivih materijala. Sonde koje se koriste prilikom ispitivanja sastoje se od električne zavojnice koja se pobuđuje izmjeničnom strujom. Izvedba ECT sonde za ispitivanje cijevi prikazana je na slici 10.



**Slika 10. Eddy current sonda za ispitivanje cijevi parogenerators nuklearnih elektrana [11]**

Izmjenična struja u zavojnici proizvodi promjenjivo magnetno polje koje oscilira na istoj frekvenciji kao struja pobude. Kada se zavojnica približi vodljivom materijalu koji se ispituje, magnetno polje zavojnice u njemu inducira vrtložne struje. Eventualne nepravilnosti u materiju uzrokovat će poremećaje vrtložnih struja koje opet uzrokuju promjenu impedancije zavojnice. Na taj način se mjerenjem impedancije mogu otkriti oštećenja u materijalu.

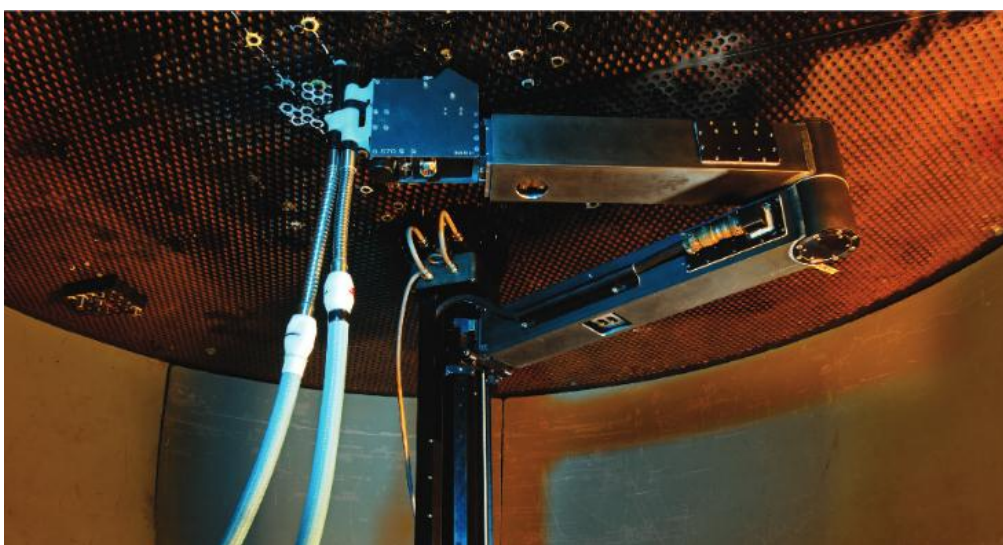
#### **1.5. Uredaji za ispitivanje parogenerators nuklearnih elektrana**

Kod ispitivanja dijelova nuklearnih elektrana važno je da ispitivanje bude brzo i učinkovito kako bi se minimaliziralo vrijeme u kojemu je dio elektrane izvan pogona. Također je važno da metoda ispitivanja zahtijeva što manje ljudskog angažmana i izlaganja zračenju. Zbog toga se za ispitivanje parogenerators nuklearnih elektrana koriste roboti, odnosno specijalizirani tipovi manipulatora.



### ***1.5.1. Starije generacije robota za ispitivanje parogeneratora***

Prvotne izvedbe robota za ispitivanje parogeneratora nuklearnih elektrana bile su velikih dimenzija i masa što je za posljedicu imalo otežano rukovanje i pozicioniranje na mjesto ispitivanja, odnosno na cijevnu stijenu. Kako je ranije pokazano na slikama 4. i 6., parogeneratori PWR tipa elektrana imaju vertikalno položene cijevi pa je u tom slučaju cijevna stijena postavljena horizontalno. Na slici 11. može se vidjeti cijevna stijena parogeneratora s postavljenim Ranger manipulatorom tvrtke Areva.



**Slika 11. Ranger, Areva [12]**

Ranger manipulator postavlja se na cijevnu stijenu pomoću stupa koji ostaje fiksno pozicioniran, a ispitivanje se vrši pomoću sonde pričvršćene na robotsku ruku, pri čemu sonda ulazi u cijev. Kada se ispituju sve cijevi u dometu robotske ruke, manipulator je potrebno nanovo namjestiti i promijeniti poziciju stupa kako bi se mogle ispitati i cijevi koje su bile prekrivene presjekom stupa. Zbog nedostataka ovakve i sličnih izvedbi, u novije vrijeme počeli su se razvijati i primjenjivati mobilni manipulatori.

### ***1.5.2. Novije generacije robota za ispitivanje parogeneratora***

Novije izvedbe robota za ispitivanja parogeneratora mobilni su manipulatori koji imaju prednost zbog manje mase i jednostavnije instalacije na cijevnu stijenu. Takve izvedbe manipulatora mogu se gibati po cijevnoj stijeni što omogućava da se nakon prvotne instalacije

ispitaju sve cijevi na cijevnoj stijeni bez potrebe za dodatnim ručnim repozicioniranjem manipulatora od strane operatera.

#### 1.5.2.1. ZR 100, Zetec

Na slici 12. prikazan je manipulator ZR 100 tvrtke Zetec koji se odlikuje vremenom instalacije manjem od 20 minuta te malim dimenzijama što omogućava istovremeno postavljanje dva manipulatora i ukupno četiri *eddy current* sonde na cijevnu stijenu.



Slika 12. ZR 100, Zetec [13]

#### 1.5.2.2. Pegasys, Westinghouse

Westinghouseovo rješenje imena Pegasys prikazano je na slici 13. Pegasys je manipulator mase 13 kg dizajniran za brzo i efikasno ispitivanje cijevi parogeneratora koristeći *eddy current* sonde.



Slika 13. Pegasys, Westinghouse [14]



#### *1.5.2.3. Forerunner, Inetec*

Hrvatska tvrtka Inetec - Institut za Nuklearnu Tehnologiju razvila je mobilni manipulator Forerunner, manipulator za ispitivanje parogenerators PWR tipa elektrana s mogućnošću prilagodbe na različite konfiguracije cijevne stijene i promjera cijevi. Forerunner, odnosno njegov specifični dio, predmet je razmatranja ovog rada. Stoga će se Forerunner i pregled njegovih relevantnih komponenti prikazati u posebnom poglavlju.

## 2. FORERUNNER I OPIS PROBLEMA

### 2.1. Forerunner

Inetecov Forerunner, mobilni manipulator za ispitivanje parogeneratora PWR tipa nuklearnih elektrana, prikazan je na slici 14. Na slici su također označeni dijelovi manipulatora bitni za razumijevanje principa prihvata na cijevnu stijenu i provedbe ispitivanja.



Slika 14. Forerunner, Inetec [11]

Forerunner se može podijeliti na dvije osi, donju i gornju, koje sadrže kućišta s mehaničkim i elektroničkim komponentama potrebnima za gibanje manipulatora. Osi manipulatora izvedene su tako da se mogu relativno gibati. Svaka os sadrži po dva pneumatska gripera koji zajedno predstavljaju mehanizam prihvata na cijevnu stijenu. Prilikom prihvata na cijevi parogeneratora, manipulator se najprije dovodi do cijevne stijene pomoću sustava za dizanje. Operater zatim pomoću pripadajućeg softvera podiže griperu pri čemu vrh gripera (prst gripera - *gripper finger*) ulazi u cijev te se u njoj zaključava. Zaključavanjem oba gripera jedne osi, cijela os ostaje zaključana (nepomična) na cijevnoj stijeni. Nakon toga sustav za dizanje može se ukloniti i manipulator može samostalno stajati na cijevnoj stijeni. Griperi na pojedinoj osi mogu se neovisno upravljati, odnosno osi mogu biti pojedinačno zaključane na cijevnu stijenu. Naizmjeničnim zaključavanjem jedne osi i pomicanjem druge, otključane osi

na drugu fiksnu poziciju, omogućeno je gibanje manipulatora po cijevnoj stijeni. Kada manipulator zauzme jednu fiksnu poziciju provodi se ispitivanje svih cijevi koje su u tom trenutku u dometu. Ispitivanje se vrši pomoću *eddy current* sonde koje se vežu na gornju os manipulatora (slika 14.).

Forerunner je dizajniran tako da se može prilagoditi na različite konfiguracije cijevnih stijena. Također je moguće ispitivanje horizontalno i vertikalno postavljenih cijevnih stijena. Moguće je ispitati i do 197 cijevi bez repozicioniranja manipulatora, što smanjuje ukupno vrijeme ispitivanja. Instalacija i deinstalacija Forerunnera pomoću pripadnog mehanizma za dizanje traje svega jednu do dvije minute. Vrijeme instalacije jedno je od ključnih parametara pri ispitivanju parogeneratorskih nuklearnih elektrana, jer smanjeno vrijeme instalacije smanjuje i vrijeme pod kojim je operater izložen zračenju.

Svi uređaji koji ispituju kontaminirane dijelove nuklearnih elektrana, pa tako i Forerunner, moraju se oblikovati tako da je moguće što lakše provesti dekontaminaciju uređaja.

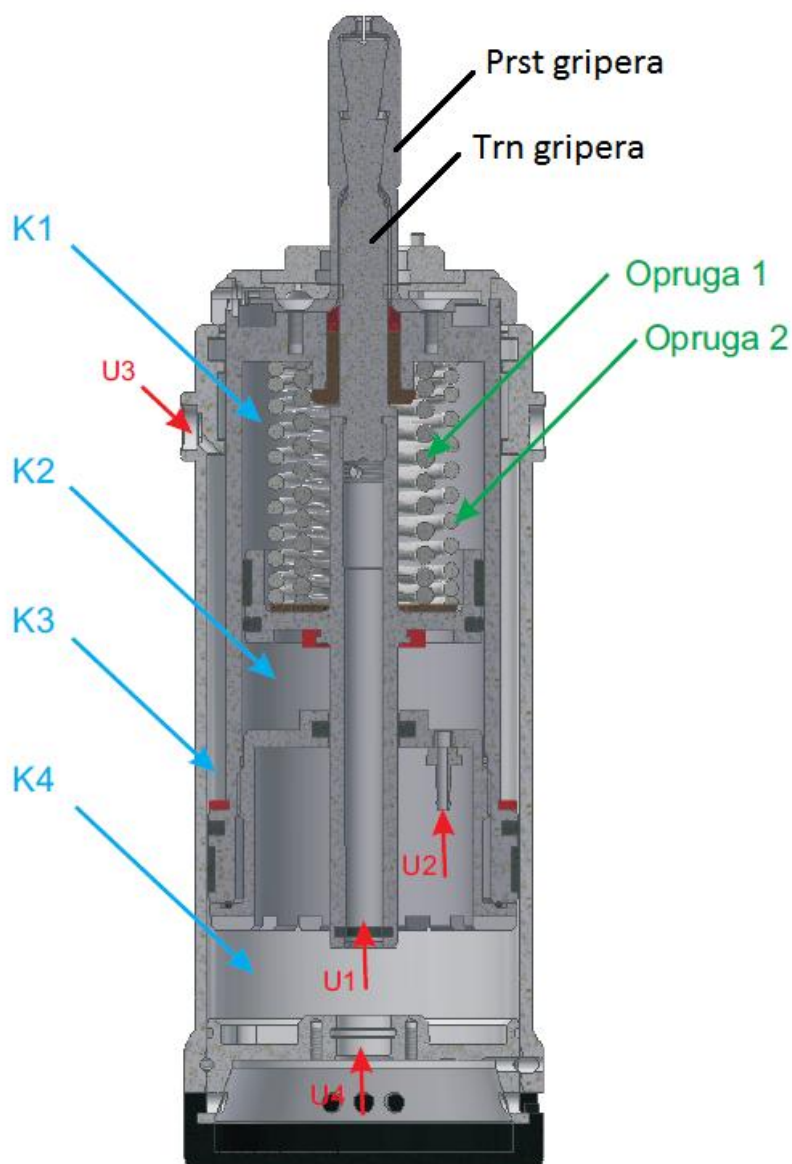
Prilikom ispitivanja cijevi važno je da sam uređaj minimalno utječe na stanje cijevi, odnosno da mehanizam prihvata bude izveden tako da zaključavanje i otključavanje unutar cijevi ne oštećuje cijev. Kako su u ovom slučaju prsti gripera jedina komponenta manipulatora koja je u direktnom kontaktu s cijevi, potrebno je posvetiti posebnu pozornost dizajnu prsta, kao i cijelog mehanizma prihvata na cijevi.

## **2.2. Mehanizam prihvata na cijevnu stijenu - pneumatski griperi**

Mehanizam prihvata na cijevnu stijenu čine četiri pneumatska gripera (slika 14.). Presjek gripera prikazan je na slici 15. Griper se sastoji od četiri komore koje su na slici prikazane oznakama K1 do K4. Oznakama U1 do U4 označeni su ulazi zraka u pojedine komore pri čemu indeksi ulaza odgovaraju indeksima komora.

Vanjsko kućište gripera vezano je za manipulator i u toku rada ono ostaje nepomično. Kako bi se griper mogao dovesti u poziciju u kojoj se može prihvatiti na cijev, u kućištu se nalazi sklop ekstenzije, odnosno podizanja gripera. Griper se podiže dovodenjem zraka u komoru K4, a u odnosu na početnu poziciju može se ukupno podići 76 mm. Kada je griper podignut dok je manipulator na cijevnoj stijeni, prst gripera nalazi se unutar cijevi. Griper se spušta dovodenjem zraka u komoru K3.

Dovođenjem zraka u komoru K1 griper se zaključava. U tom stanju prst gripera se širi te u slučaju kada se nalazi unutar cijevi dolazi u kontakt sa stijenkom cijevi. Ostvarivanjem dovoljno velikog pritiska na stijenku cijevi, prst gripera, a tako i cijeli griper i os manipulatora, ostaju zaključani na cijevnoj stijeni. U slučaju kada je griper bez zraka, on ostaje u zaključanom stanju zbog ugrađenih opruga. Na taj način se osigurava da manipulator ne padne s cijevne stijene. Griper se otključava dovođenjem zraka u komoru K2.



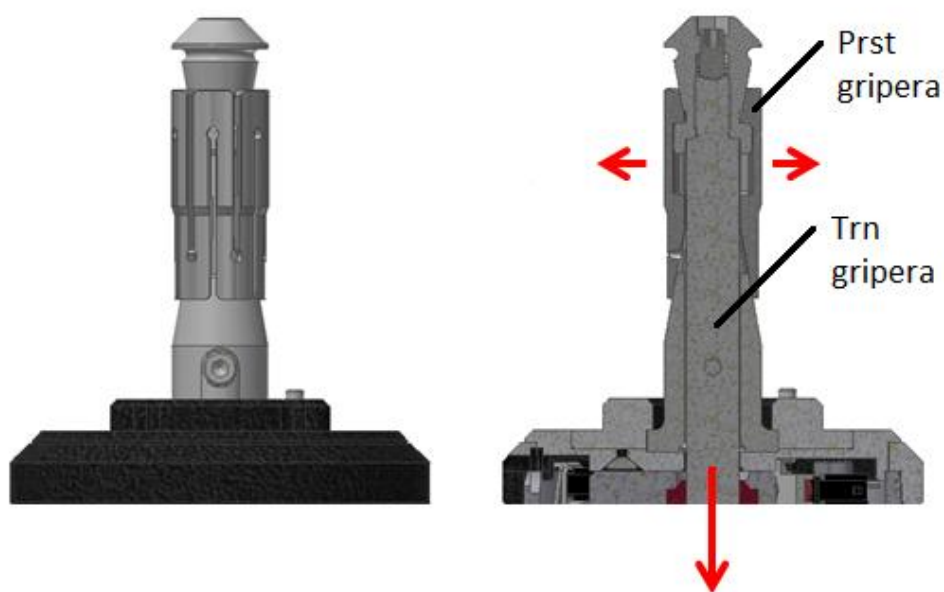
Slika 15. Presjek gripera

Griper dakle može biti podignut ili spušten te zaključan ili otključan. Osnovna funkcija gripera je hvatanje za cijevi parogeneratorsa pri čemu je griper podignut i zaključan.

Osim prihvaćanja na cijev, griper ima i funkciju niveliranja manipulatora. Naime, tijekom gibanja manipulatora po horizontalno postavljenoj cijevnoj stijeni postoji i određeni vertikalni pomak prema dolje. Taj pomak ne mora biti značajan, no uz dugotrajan rad manipulatora, odnosno uz velik broj koraka po cijevnoj stijeni, može biti dovoljan da ugrađeni kontakti senzori na griperima jedne osi daju informaciju da griperi u podignutom stanju nisu u kontaktu s cijevnom stijenom. U tom slučaju koristi se komora za spuštavanje gripera druge osi koja je u tom trenutku zaključana. Spuštanjem gripera koji su u zaključanom stanju u cijevi, manipulator se ustvari podiže. Na taj način se i griperi druge osi dovode u pravilnu poziciju unutar cijevi te se manipulator izravna.

### 2.3. Postojeća izvedba i princip rada prsta gripera

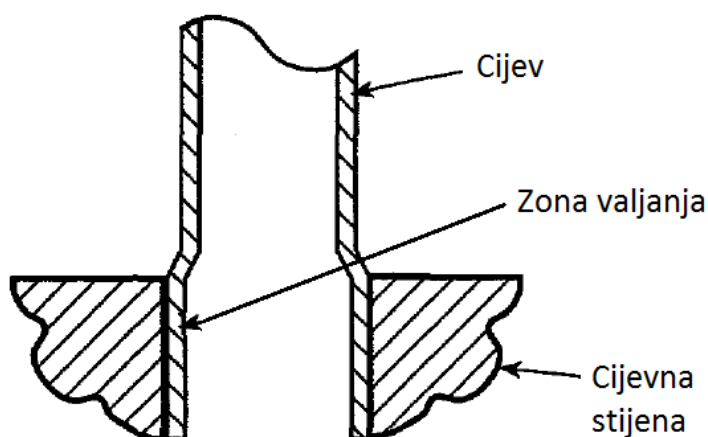
Dio gripera koji ostvaruje kontakt s unutarnjom stijenkom cijevi parogeneratorsa jest prst gripera. Na slici 16. prikazan je CAD model postojeće izvedbe prsta gripera, gdje je desno prikazan model u presjeku s označenim prstom i trnom gripera. Trn gripera nalazi se na osi simetrije gripera i u kontaktu je s prstom gripera, a s ostatkom mehanizma za zaključavanje vezan je vijčanom vezom, što se može vidjeti i na slici 15.



Slika 16. Postojeća izvedba prsta gripera

Princip rada prsta gripera temelji se na kosini u mehanizmu prsta. Prilikom zaključavanja gripera, komora K1 puni se zrakom što uzrokuje spuštanje trna gripera vertikalno prema dolje (slike 15. i 16.). Spuštanjem trna, opružni se element prsta gripera preko kosine radijalno širi i dolazi u kontakt sa stijenkom cijevi.

Kontakt prsta gripera sa stijenkom cijevi vrši se na određenoj poziciji unutar cijevi, što je povezano s načinom na koji su cijevi spojene s cijevnom stijenom. Taj spoj izvodi se tako da se cijev najprije postavi u odgovarajuću rupu na cijevnoj stijeni, a zatim se u cijev dovodi alat s valjcima koji se radijalno širi i valja cijev uz cijevnu stijenu. Na taj način cijev se plastično deformira i ostvaruje spoj s cijevnom stijenom. Dio cijevi koji je tako plastično deformiran naziva se zona valjanja ili *expansion zone*. Na slici 17. prikazana je skica spoja cijevi i cijevne stijene s označenom zonom valjanja.



**Slika 17. Spoj cijevi i cijevne stijene s označenom zonom valjanja [15]**

Osim navedenog valjanja, cijev se na jednom dijelu dodatno zavaruje na cijevnu stijenu. Taj zavar međutim nema značajnu ulogu u povećanju krutosti cijevi, već sprječava miješanje vode primarnog i sekundarnog kruga.

Kako prst gripera mora biti izveden tako da minimalno ostećuje cijev, odnosno da pritisak na cijev bude što manji, poželjno je da površina kojom se prst hvata na cijev bude što veća. Zbog toga, kao i zbog izbjegavanja spomenutog zavara, prst se hvata za cijev u zoni valjanja.

## 2.4. Opis problema

Opisana postojeća izvedba prsta (slika 16.) sastoji se od nekoliko elemenata. Nedostatak takve izvedbe leži u opasnosti izgubljenih dijelova, odnosno dijelova koji se tijekom ispitivanja mogu odvojiti i zagubiti u parogeneratoru. U cilju povećanja sigurnosti i smanjenja vremena u kojoj je elektrana izvan pogona, u nuklearnoj industriji nastoji se provoditi tzv. proces isključenja stranih materijala ili *foreign material exlussion* (FME). To je ustvari proces prevencije ulaska stranih dijelova ili krhotina u područja u kojima takvi dijelovi ili krhotine mogu prouzročiti financijsku štetu ili ugroziti ljudsku sigurnost. Taj koncept provodi se i u drugim industrijama, primjerice u zrakoplovnoj insdustriji.

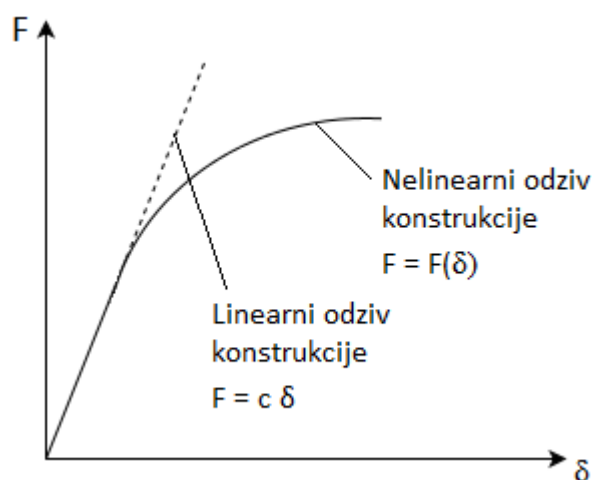
Cilj ovog rada je u suradnji s tvrtkom Inetec dizajnirati prst gripera koji se neće sastojati od više elemenata, nego samo od jednog. Taj element mora biti lako izmjenjiv te pouzdano raditi u elastičnom području i nakon velikog broja ciklusa. Proces zaključavanja novog prsta u cijev razmatrat će se preko odgovarajućeg računalnog modela. Koristit će se metoda konačnih elemenata i programski paket Abaqus. Numeričkom provjerom naprezanja nastoji se smanjiti broj prototipa i usmjeriti proces konstruiranja novog prsta. Kod modeliranja procesa zaključavanja u kojemu dolazi do širenja prsta, potrebno je zbog prisutnih kontakata između trna i prsta, kao i zbog uključenih velikih deformacija prsta, koristiti nelinearnu analizu.

U sljedeća dva poglavlja dat će se kratak osvrt na nelinearnu analizu te će se pojasniti ključni pojmovi i koncepti potrebni za modeliranje kontakta u Abaqusu.

### 3. OSNOVE NELINEARNE ANALIZE KONSTRUKCIJA I MODELIRANJA KONTAKTA

#### 3.1. Nelinearna analiza konstrukcija

Kod rješavanja problema u kojima je potrebno uzeti u obzir određene pojave koje se ne mogu opisati linearim pristupom, kao što je promjena krutosti tijekom deformiranja konstrukcije, potrebno je koristiti nelinearnu analizu. Na slici 18. prikazan je primjer linearog i nelinearnog odziva konstrukcije u dijagramu ovisnosti pomaka o nametnutoj sili.



Slika 18. Linearni i nelinearni odziv konstrukcije

Kod linearne analize moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

- Pomaci su mali, ravnoteža se razmatra na nedeformiranom obliku i opterećenje ne mijenja smjer
- Ponašanje materijala je linearno elastično
- Eventualne nehomogenosti i anizotropija u materijalu nisu funkcija opterećenja
- Linearna veza između deformacija i pomaka

U slučaju kada jedan od ovih uvjeta nije ispunjen, radi se o nelinearnom ponašanju konstrukcije [16].



Razlikujemo geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Kod prisutnosti velikih deformacija uvjeti ravnoteže postavljaju se na deformiranom obliku konstrukcije i tada govorimo o geometrijskoj nelinearnosti. U slučaju materijalne nelinearnosti, nelinearnost je uvjetovana neelastičnim ponašanjem materijala.

Nelinearna analiza ima široku primjenu kod rješavanja problema u kojima su prisutni različiti nelinearni odzivi konstrukcija, kod rješavanja problema stabilnosti te elastoplastičnog ponašanja materijala. Pri rješavanju takvih nelinearnih problema primjenjuju se različite numeričke metode.

### 3.1.1. O nelinearnoj formulaciji

Za linearnu analizu vrijedi poznata relacija iz metode konačnih elemenata

$$\mathbf{K} \mathbf{V} = \mathbf{R}, \quad (1)$$

gdje je  $\mathbf{K}$  linearna matrica krutosti koja je konstantna,  $\mathbf{V}$  je vektor čvornih stupnjeva slobode, a  $\mathbf{R}$  vektor čvornih sila. Izraz (1) predstavlja eksplicitnu jednadžbu krutosti, a u indeksnom zapisu može se zapisati kao

$$K_{ij} V_j = R_i. \quad (2)$$

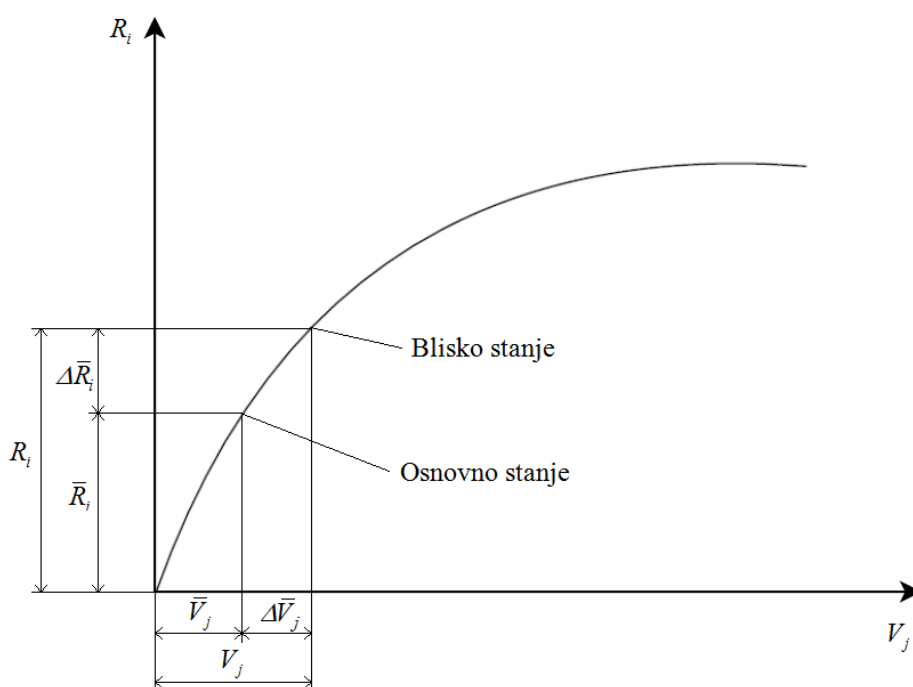
Kod nelinearne formulacije ne postoji linearna eksplicitna veza između krutosti i opterećenja, a ne vrijedi niti zakon superpozicije. Uvjet ravnoteže je da su unutarnje sile jednake vanjskom opterećenju, a taj uvjet opisan je relacijom

$$\mathbf{G}(\mathbf{V}) = \mathbf{R}, \quad (3)$$

gdje je  $\mathbf{G}$  nelinearna vektorska funkcija unutarnjih sila. Unutarnje sile su funkcija čvornih pomaka, stoga i  $\mathbf{G}$  možemo zapisivati kao funkciju čvornih pomaka  $\mathbf{V}$ . Izraz (3) može se zapisati kao

$$\begin{bmatrix} G_1(V_1, V_2, \dots, V_n) \\ G_2(V_1, V_2, \dots, V_n) \\ \vdots \\ G_n(V_1, V_2, \dots, V_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Kod nelinearne analize potrebno je opisati nelinearni odziv konstrukcije, što je u formulaciji metode pomaka međusobna ovisnost opterećenja i pomaka. To je moguće postići samo inkrementalno - iterativnim metodama. Pri tome se opterećenje ili pomak dijeli na određeni broj inkremenata te se iz osnovnog ravnotežnog stanja traži ravnoteža bliskog stanja koje je definirano porastom opterećenja ili pomaka. Na slici 19. prikazan je dijagram ovisnosti opterećenja i pomaka s označenim osnovnim i bliskim stanjem.



**Slika 19. Prikaz osnovnog i bliskog stanja kod nelinearnog odziva konstrukcije [16]**

Osnovno stanje definirano je vektorom opterećenja  $\bar{R}_i$  i vektorom pomaka  $\bar{V}_j$ . Osnovno stanje je dakle ravnotežno stanje konstrukcije. Blisko stanje definirano je opterećenjem  $R_i$  i pomakom  $V_j$ . Do ravnoteže bliskog stanja dolazi se u u pojedinom inkreментu različitim iterativnim postupcima. Nakon postizanja ravnoteže, blisko stanje postaje novo osnovno stanje za naredni inkrement. Inkrementi opterećenja i pomaka jednaki su specijalnoj prvoj varijaciji pa se može pisati

$$\begin{aligned}\Delta \bar{R}_i &= \delta \bar{R}_i, \\ \Delta \bar{V}_j &= \delta \bar{V}_j.\end{aligned}\tag{5}$$

Ravnoteža bliskog stanja postignuta je kada vrijedi

$$\begin{aligned} R_i &= \bar{R}_i, \\ V_j &= \bar{V}_j. \end{aligned} \quad (6)$$

Da bi se spomenuti inkrementalni postupak mogao provesti, potrebno je izvesti eksplicitnu jednadžbu krutosti za inkrementalni pomak. Za to može poslužiti slika 19. Prvi korak je inkrementiranje vektora opterećenja i vektora pomaka. Prema slici 19. i izrazu (5) vrijedi

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \bar{\mathbf{R}} + \Delta \mathbf{R} = \bar{\mathbf{R}} + \bar{\delta} \bar{\mathbf{R}}, \\ \mathbf{V} &= \bar{\mathbf{V}} + \Delta \mathbf{V} = \bar{\mathbf{V}} + \bar{\delta} \bar{\mathbf{V}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Zatim se provodi varijacija implicitne jednadžbe krutosti koja je prikazana izrazom (3).

Varijacija se provodi obzirom na osnovno stanje. Provođenjem varijacije dobiva se

$$\mathbf{G}(\mathbf{V}) - \mathbf{R} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

$$\bar{\delta} [\mathbf{G}(\mathbf{V}) - \mathbf{R}] = \mathbf{0}, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right|_{\bar{\mathbf{V}}} \bar{\delta} \bar{\mathbf{V}} - \bar{\delta} \bar{\mathbf{R}} = \mathbf{0}. \quad (10)$$

Iz izraza (7) slijedi

$$\bar{\delta} \bar{\mathbf{R}} = \mathbf{R} - \bar{\mathbf{R}} \quad (11)$$

pa se izraz (10) može zapisati kao

$$\left. \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right|_{\bar{\mathbf{V}}} \bar{\delta} \bar{\mathbf{V}} = \mathbf{R} - \bar{\mathbf{R}}. \quad (12)$$

Prvi član u gornjem izrazu predstavlja tangencijalnu matricu krutosti

$$\left. \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right|_{\bar{\mathbf{V}}} = \mathbf{K}_T(\bar{\mathbf{V}}). \quad (13)$$

Kako je osnovno stanje ravnotežno stanje, vrijedi

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}} &= \mathbf{G}(\bar{\mathbf{V}}), \\ \mathbf{G}(\bar{\mathbf{V}}) &= \mathbf{R}_i(\bar{\mathbf{V}}), \end{aligned} \quad (14)$$

gdje je  $\mathbf{R}_i(\bar{\mathbf{V}})$  vektor unutarnjih sila.

Uzimajući u obzir izraz (5), jednadžba (12) može se konačno zapisati kao

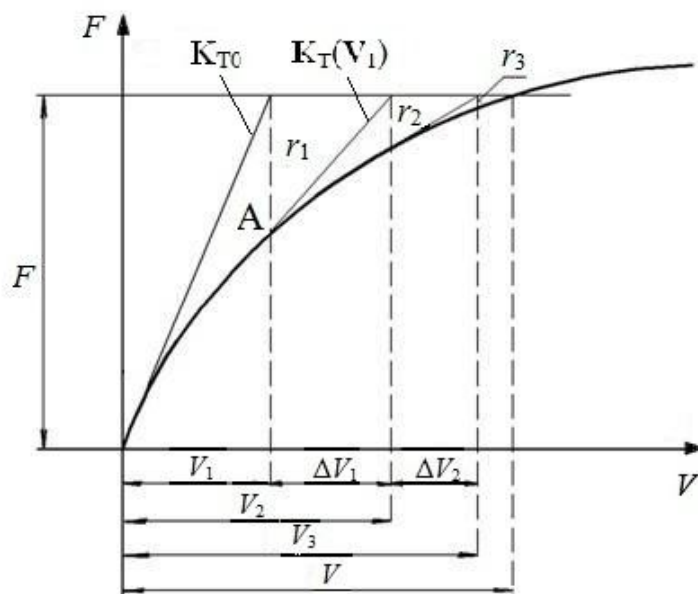
$$\mathbf{K}_T(\bar{\mathbf{V}}) \Delta \bar{\mathbf{V}} = \mathbf{R} - \mathbf{R}_i(\bar{\mathbf{V}}). \quad (15)$$

Izraz (15) predstavlja jednadžbu krutosti za inkrementalni pomak. Ravnoteža je postignuta kada vrijedi

$$\mathbf{R} - \mathbf{R}_i(\bar{\mathbf{V}}) = \mathbf{0}. \quad (16)$$

### 3.1.2. Newton - Raphsonov iteracijski postupak

Newton - Raphsonova iteracijska metoda jedna je od metoda koja se koristi za rješavanje jednadžbe krutosti (15). Pri tome se iteracije vrše u svakom inkrementu opterećenja. Postupak iteriranja za jedan inkrement opterećenja prikazan je na slici 20.

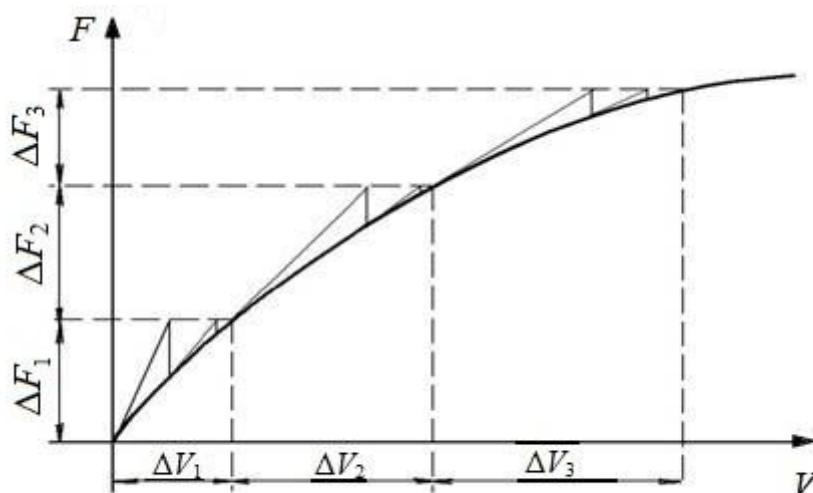


Slika 20. Newton - Raphsonov iteracijski postupak [17]

U postupku iteriranja se prema slici 20. koristi početna tangencijalna krutost  $\mathbf{K}_{T0}$  i zadano opterećenje  $F$  za izračunavanje pomaka  $\mathbf{V}_1$ . U točki A izračunava se zatim nova tangencijalna krutost  $\mathbf{K}_T(\mathbf{V}_1)$  nakon čega je moguće izračunati inkrementalni pomak  $\Delta \mathbf{V}_1$ . Pomak  $\mathbf{V}_2$  tada je jednak zbroju vektora pomaka  $\mathbf{V}_1$  i  $\Delta \mathbf{V}_1$ . Na analogan način izračunava se i pomak  $\mathbf{V}_3$  te konačno ukupni pomak  $\mathbf{V}$ . Tangencijalna matrica krutosti računa se dakle u svakom iteracijskom koraku.

U svakom iteracijskom koraku računa se i razlika vanjskog opterećenja i unutranjih sila (vektor neuravnoteženja) koja je na slici 20. označena s  $r$ . Ukoliko bi ta razlika (rezidual) u nekoj točki bila jednaka nuli, točka bi ležala na krivulji opterećenje - pomak i konstrukcija bi bila u ravnoteži. U nelinearnoj analizi praktično se nikada ne postiže da je taj rezidual jednak nuli, već se rezidual uspoređuje s nekim odabranim, dovoljno malim brojem. Ukoliko je rezidual u nekom iteracijskom koraku manji od odabranog kontrolnog broja, smatra se da je postignuto ravnotežno stanje.

Kako bi se krivulja opterećenje - pomak mogla adekvatno opisati, kod nelinearnog odziva konstrukcija kombinira se opisana iterativna metoda s postupkom inkrementiranja opterećenja ili pomaka. Opterećenje ili pomak ne zadaju se u jednom koraku, nego postepeno. Kada se postigne ravnoteža u jednom inkreментu, dodaje se sljedeći inkrement. Iterativni proces provodi se dakle u svakom inkreментu, kao što je prikazano na slici 21.

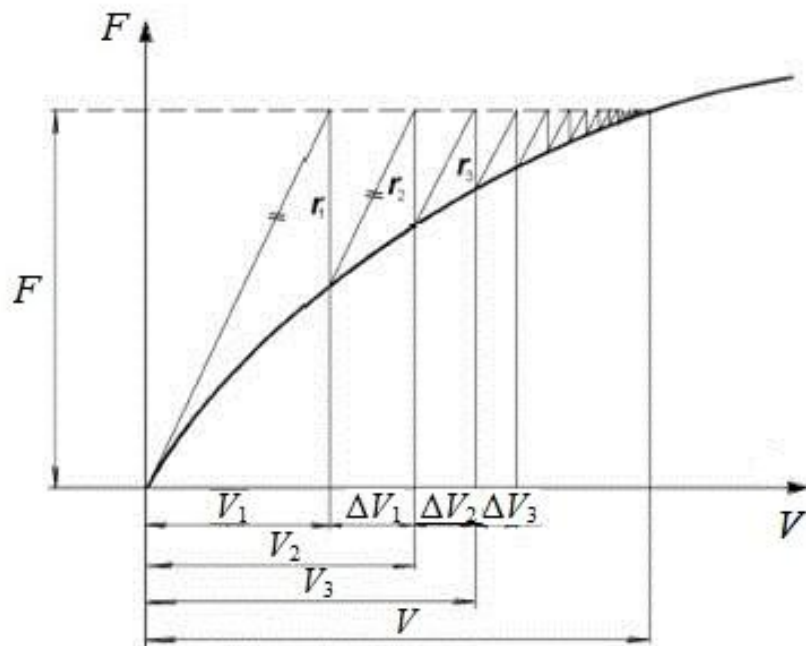


**Slika 21. Newton - Raphsonova iteracijska metoda kombinirana s postupkom inkrementiranja**  
[17]

#### 3.1.2.1. Modificirani Newton - Raphsonov postupak

Kod modificiranog Newton - Raphson iteracijskog postupka matrica tangencijalne krutosti ne računa se u svakom iteracijskom koraku, nego se koristi početna tangencijalna krutost za svaki korak, kako je prikazano na slici 22. Posljedica toga je sporija konvergencija u odnosu na obični Newton - Raphson postupak. S druge strane, postupak je jednostavniji pa se primjenjuje kod složenih problema koji uključuju i geometrijsku i materijalnu nelinearnost.

U slučajevima kada krivulja opterećenje - pomak ima tjeme, Newton - Raphson postupak ne može se primijeniti. Naime, u tom slučaju matrica tangencijalne krutosti bi u tjemenu bila jednaka nuli i područje poslije tjemena krivulje ne bi se moglo opisati. U tom slučaju primjenjuje se složeniji Riks - Wempner - Wessels iteracijski postupak koji se ovdje neće detaljnije prikazivati. U slučajevima u kojima se može primijeniti Newton - Raphson postupak, rješenja koja daju Newton Raphson i Riks postupak su jednaka.



Slika 22. Modificirani Newton-Raphson iteracijski postupak [17]

### 3.1.3. Primjena konačnih elemenata

Jednadžba konačnog elementa za nelinearnu analizu izvodi se na sličan način kao kod linearne analize. Taj izvod može se naći u [18]. Razlika je u tome što se kod nelinearne analize u osnovnim jednadžbama teorije elastičnosti pojavljuju određeni nelinearni diferencijalni operatori.

Polazi se od principa virtualnih pomaka

$$\int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q} dV + \int_S \delta \mathbf{u}_s^T \mathbf{q}_b dS - \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV = 0. \quad (17)$$

U gornjem izrazu  $\mathbf{u}$  je vektor pomaka,  $\mathbf{u}_s$  je vektor pomaka na rubu tijela,  $\mathbf{q}$  je vektor volumenskih sila,  $\mathbf{q}_b$  vektor površinskog opterećenja,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  je tenzor deformacije, a  $\boldsymbol{\sigma}$  tenzor naprezanja.

Uvjeti ravnoteže su

$$[\mathbf{D}_{eL} + \mathbf{D}_{eN}(\mathbf{u})] \boldsymbol{\sigma} = -\mathbf{q}. \quad (18)$$

Konstitutivna realcija glasi

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (19)$$

Veza između deformacije i pomaka, odnosno kinematičke relacije, dane su izrazom

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left[ \mathbf{D}_{kL} + \frac{1}{2} \mathbf{D}_{kN}(\mathbf{u}) \right] \mathbf{u}. \quad (20)$$

Rubni uvjeti sila glase

$$\mathbf{q}_b = \mathbf{R}_{qL} + \mathbf{R}_{qN}(\mathbf{u}), \quad (21)$$

a rubni uvjeti pomaka su

$$\mathbf{u}_b = \mathbf{R}_u \mathbf{u}. \quad (22)$$

U izrazima (18) do (22)  $\mathbf{D}_{eL}$ ,  $\mathbf{D}_{kL}$ ,  $\mathbf{R}_{qL}$  i  $\mathbf{R}_u$  su linearni diferencijalni operatori, a  $\mathbf{D}_{eN}$ ,  $\mathbf{D}_{kN}$  i  $\mathbf{R}_{qN}$  nelinearni diferencijalni operatori.

Kako se u nelinearnoj analizi traži ravnoteža bliskog stanja, potrebno je za to stanje postaviti princip virtualnih pomaka. Stoga se princip virtualnih pomaka izvodi u inkrementalnom obliku. Provodi se inkrementiranje pomaka i vanjskih sila pa se može pisati

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \bar{\mathbf{u}} + \Delta \mathbf{u}, \\ \mathbf{q} &= \bar{\mathbf{q}} + \Delta \mathbf{q}, \\ \mathbf{q}_b &= \bar{\mathbf{q}}_b + \Delta \mathbf{q}_b, \end{aligned} \quad (23)$$

gdje se veličine  $\bar{\mathbf{u}}$ ,  $\bar{\mathbf{q}}$  i  $\bar{\mathbf{q}}_b$  odnose na osnovno stanje, a  $\Delta \mathbf{u}$ ,  $\Delta \mathbf{q}$  i  $\Delta \mathbf{q}_b$  predstavljaju inkrementalne veličine. Uvrštavanjem (23) u izraze (18) do (22), provođenjem diskretizacije prema poznatom izrazu

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{N} \mathbf{v}, \\ \bar{\mathbf{u}} &= \mathbf{N} \bar{\mathbf{v}}, \\ \Delta \mathbf{u} &= \mathbf{N} \Delta \mathbf{v}, \end{aligned} \quad (24)$$

gdje je  $\mathbf{N}$  matrica funkcija oblika, te uvrštavanjem u princip virtualnih pomaka dolazi se do jednadžbe konačnog elementa

$$\mathbf{K}_T(\bar{\mathbf{V}}) \Delta \bar{\mathbf{V}} = \mathbf{R} - \mathbf{R}_i(\bar{\mathbf{V}}). \quad (25)$$

Za rješavanje se primjenjuju inkrementalno - iterativne metode, npr. Newton - Raphson metoda.

## 3.2. Modeliranje kontakta u Abaqusu

### 3.2.1. Formulacija kontakta

Programski paket Abaqus nudi nekoliko formulacija kontakta. Svaka formulacija temelji se na odabiru jedne od metoda diskretizacije kontakta, odabiru takozvanog *tracking approach*-a te na

definiranju *master* i *slave* uloga u kontaktnom paru.

Dva moguća *tracking approach*-a su:

- *finite sliding*
- *small sliding*

*Finite sliding* je općenitija metoda koja dopušta i velika gibanja kontaktnih površina, dok *small sliding* pretpostavlja relativno mala klizanja jedne površine po drugoj.

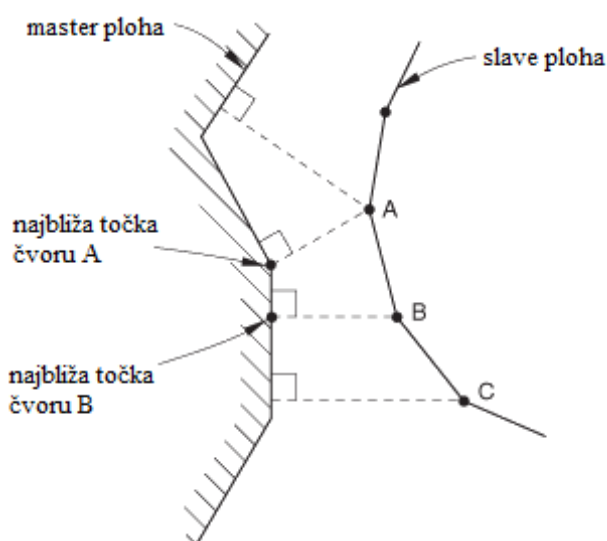
Diskretizacija kontakta provodi se u Abaqusu sljedećim metodama:

- *Node to surface*
- *Surface to surface*

Navedeno vrijedi za Abaqus/Standard. Abaqus/Explicit nudi i druge mogućnosti diskretizacije kontakta.

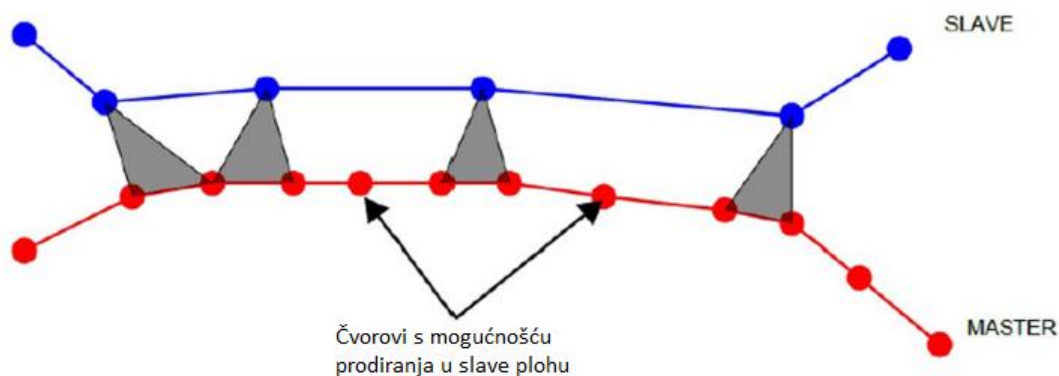
#### 3.2.1.1. *Node to surface* diskretizacija kontakta

Kod *node to surface* diskretizacije svaki *slave* čvor projicira se na najbliže mjesto na *master* plohu, prema slici 23. U projiciranu točku interpoliraju se relevantne vrijednosti analize iz okolnih *master* čvorova. Na taj način, kontakt je uvjetovan interakcijom pojedinog *slave* čvora i njemu pripadne grupe *master* čvorova koji se svode na odgovarajuću projiciranu točku. Kod ove metode diskretizacije moguće je prodiranje *master* čvorova u *slave* površinu, što je prikazano na slici 24.



Slika 23. *Node to surface* diskretizacija kontakta [19]

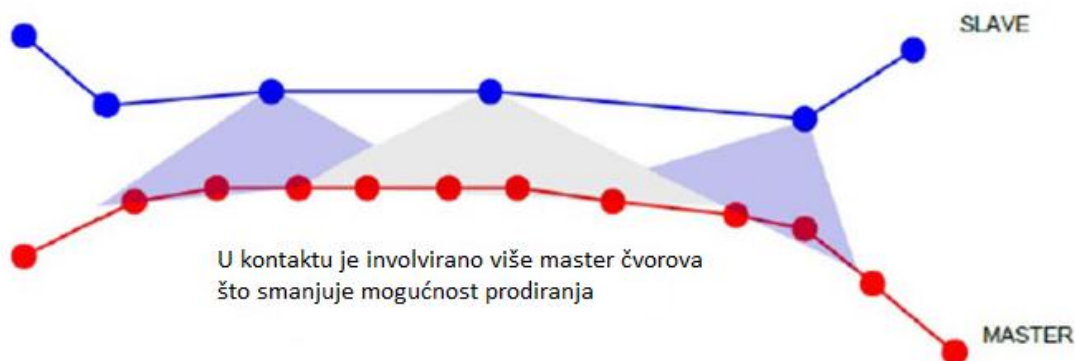




Slika 24. Mogućnost prodiranja čvorova kod *Node to surface* diskretizacije [20]

### 3.2.1.2. *Surface to surface* diskretizacija kontakta

Kod *surface to surface* diskretizacije kontakt se definira između *slave* čvora i većeg dijela *master* površine oko njega, kako je prikazano na slici 25. Ovdje je također moguća pojava malog prodiranja pojedinih čvorova, no značajno prodiranje *master* čvorova u *slave* površinu nije prisutno kod ove diskretizacije.



Slika 25. *Surface to surface* diskretizacija kontakta [20]

### 3.2.2. Metode definiranja „hard“ kontakta

Pri modeliranju kontakta potrebno je također definirati metodu nametanja relacije pritisak - prodiranje, što se obično radi tkz. *hard* kontaktom. Kod *hard* kontakta, bilo koji kontaktni pritisak može se prenijeti između površina koje su u kontaktu. Kada je kontaktni pritisak jednak nuli, površine se razdvajaju. Postoje dvije osnovne metode definiranja *hard* kontakta:

- Direktna metoda (*Direct enforcement method*)
- *Penalty* metoda

Kod direktne metode definiranja *hard* kontakta vrši se egzaktno nametanje relacije pritisak - prodiranje primjenom Lagrangeovih multiplikatora. Prednost ove metode je točnost, jer su kontaktna ograničenja zadovoljena egzaktno. Nedostaci ove metode su produženo vrijeme računanja te mogući problemi povezani s konvergencijom.

Kod *penalty* metode relacija pritisak - prodiranje nameće se aproksimativno. Pri tome se uvodi virtualna opruga odabrane krutosti za zadovoljavanje kinematskog ograničenja. Prednost *penalty* metode je dobra brzina konvergencije te bolje performanse rješavača jednačbi u odnosu na direktnu metodu. Nedostatak ove metode je mali iznos prodiranja čvorova te eventualna potreba prilagođavanja *penalty* krutosti.

Ovisno o korištenoj metodi, u izraz za ukupnu potencijalnu energiju uključuju se odgovarajuća kinematska ograničenja kontakta. Detaljniji opis teorijskih principa kod definiranja kontakta u Abaqusu može se naći u [19].

## 4. DEFINIRANJE ANALIZE U ABAQUSU I VERIFIKACIJA NUMERIČKOG MODELA

Abaqus FEA programski je paket za analizu metodom konačnih elemenata. Analiza je u Abaqusu podijeljena na nekoliko funkcionalnih cjelina, tkz. modula, pri čemu se pojedini koraci analize definiraju u odgovarajućem modulu.

### 4.1. Definiranje geometrijske nelinearnosti

Kod analize prsta gripera potrebno je zbog prisutne geometrijske nelinearnosti koristiti model velikih pomaka. U Abaqusu se geometrijska nelinearnost definira u modulu *Step*. Potrebno je kreirati novi korak opterećenja (*step*) gdje se odabire opcija *Static - General* za Newton - Raphson iteracijsku metodu ili *Static - Riks* za Riks - Wempner - Wessels iteracijsku metodu. U ovom slučaju odabrat će se *Static - General*. U prozoru *Edit Step* pod *Basic* nalazi se opcija *Nlgeom*. Uključivanjem opcije *Nlgeom* prelazi se s teorije malih pomaka na teoriju velikih pomaka. Na taj način tenzor deformacije će sadržavati i nelinearni dio, kako je prikazano izrazom (20) u potpoglavlju 3.1.3.

U modulu *Step* se također definira broj inkremenata opterećenja ili pomaka. U prozoru *Edit Step*, pod *Incrementation* upisuje se veličina inkrementa (*Increment size*). Upisivanjem primjerice vrijednosti 0.1 za početnu i maksimalnu vrijednost inkrementa nametnuto opterećenje ili pomak podijelit će se u deset inkremenata.

### 4.2. Definiranje kontakta

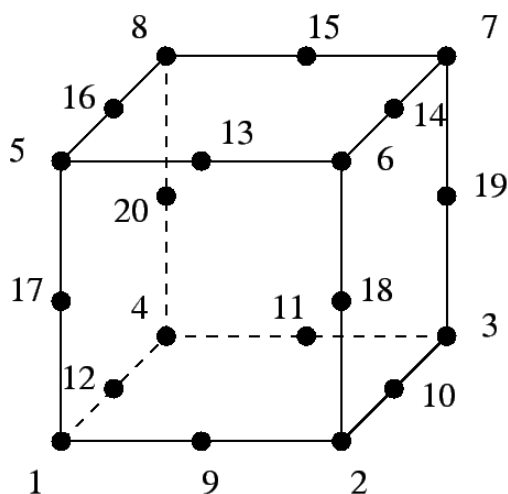
Kontakt između površina u Abaqusu definira se u modulu *Interaction*. Potrebno je najprije kreirati tkz. *Interaction property* gdje se definira normalno i tangencijalno ponašanje. Odabirom opcije *Mechanical - Normal behavior* u prozoru *Edit interaction property* definira se relacija opterećenje - prodiranje gdje se odabire *Hard contact*. Koristit će se *penalty* metoda definiranja *hard* kontakta pa se pod *constraint enforcement method* odabire *Penalty (standard)*, a pod *contact stiffnes behavior* odabire se *nonlinear*.

Ponašanje u tangencijalnom smjeru definira se opcijom *Mechanical - Tangential Behavior*, gdje se može zadati i koeficijent trenja.

Nakon definiranja *Interaction property*-a, potrebno je kreirati vezu pomoću opcije *Create Interaction*. Odabire se *surface to surface* kontakt nakon čega je potrebno odabrati *master* i *slave* pohnu. Pod *discretization method* odabire se jedna od metoda diskretizacije kontakta koje su navedene u potpoglavlju 3.2.1. Ovdje će se odabrati *surface to surface* metoda. Pod *sliding formulation* odabire se *finite sliding* (poglavlje 3.2).

#### 4.3. O korištenom konačnom elementu

Nakon definiranja kontakta u modelu te postavljanja opterećenja i rubnih uvjeta, potrebno je kreirati mrežu konačnih elemenata. Za analizu će se koristiti heksaedarski element drugog reda s reduciranom integracijom koji u Abaqusu nosi naziv C3D20R, gdje C označava Continuum Stress/Displacement, 3D označava trodimenzionalnu analizu, broj 20 označava broj čvorova, a slovo R reduciranu integraciju. Navedeni element prikazan je na slici 26.

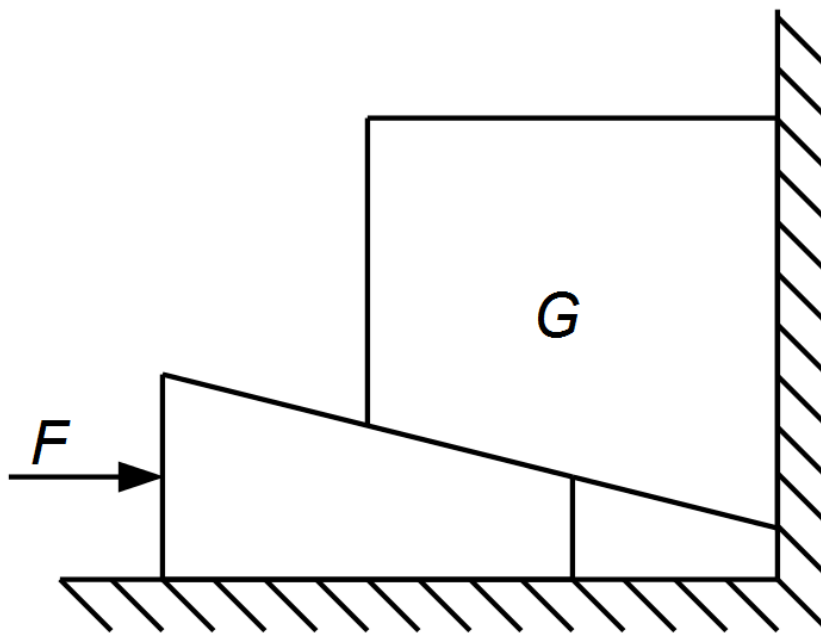


Slika 26. C3D20R konačni element [21]

Poznato je da se matrica krutosti u slučaju složenih podintegralnih funkcija izračunava postupkom numeričke integracije, pri čemu svaki element ima određeni red integracije i položaj integracijskih točaka. Heksaedarski element drugog reda ima  $3 \times 3 \times 3$  točke integracije, dok element s reduciranom integracijom ima  $2 \times 2 \times 2$  točke integracije. C3D20R često je korišteni element s dobrim svojstvima te će se koristiti u verifikacijskom primjeru i kasnijim analizama prsta.

#### 4.4. Verifikacija numeričkog modela

Postojeći mehanizam prsta gripera temelji se na principu kosine. Taj princip zadržat će se i u novoj verziji prsta pa će se verifikacija opisanih metoda modeliranja provesti na primjeru kontakta klinova. Skica verifikacijskog problema prikazana je na slici 27.



Slika 27. Verifikacijski primjer kontakta u Abaqusu

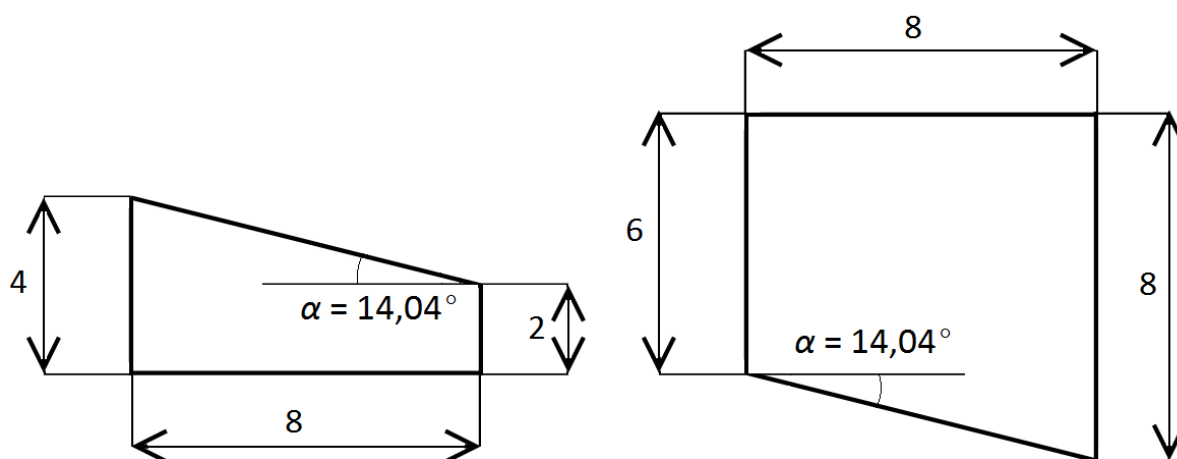
Slika prikazuje blok težine  $G$  koji je postavljen na klin zanemarive težine. Blok je prislonjen uz vertikalni zid. Kontakt se u ovom primjeru zadaje između bloka i klina, između klina i podloge te između bloka i vertikalnog zida.

Verifikacija će se provesti za dva slučaja. U prvom slučaju će se umjesto sile nametnuti horizontalni pomak na klin. Klin će se na taj način pomaknuti do vertikalnog zida i podići blok. Prema odabranim dimenzijama i očekivanim pomacima klina i bloka može se tako provjeriti pouzdanost zadanih kontakata prilikom gibanja.

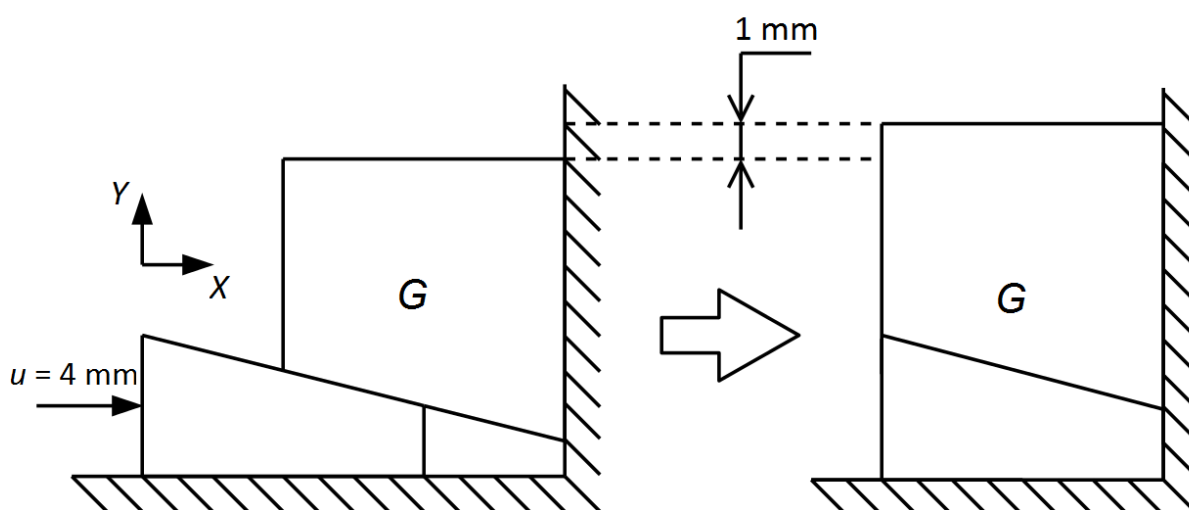
U drugom slučaju razmotrit će se stanje granične ravnoteže sustava. Analitičkim putem naći će se najveći iznos sile  $F$  koja još ne uzrokuje gibanje klina te će se izračunati pripadne reakcije. Provjerom reakcijske sile kontakta u Abaqusu potvrdit će se na taj način pravilan prijenos sile među površinama u kontaktu.

#### 4.4.1. Prvi slučaj - gibanje klina i bloka

U prvom slučaju koji će se razmotriti nametnut će se horizontalni pomak na klin u iznosu od 4 mm. Na slici 28. prikazane su odabrane dimenzije klina i bloka, a na slici 29. početni i krajnji položaj sustava.



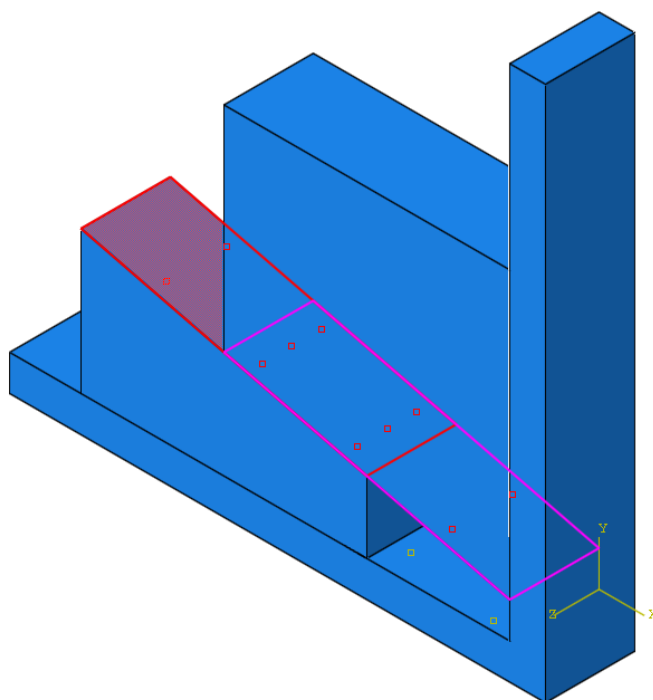
Slika 28. Odabrane dimenzije klina i bloka



Slika 29. Početni i krajnji položaj sustava

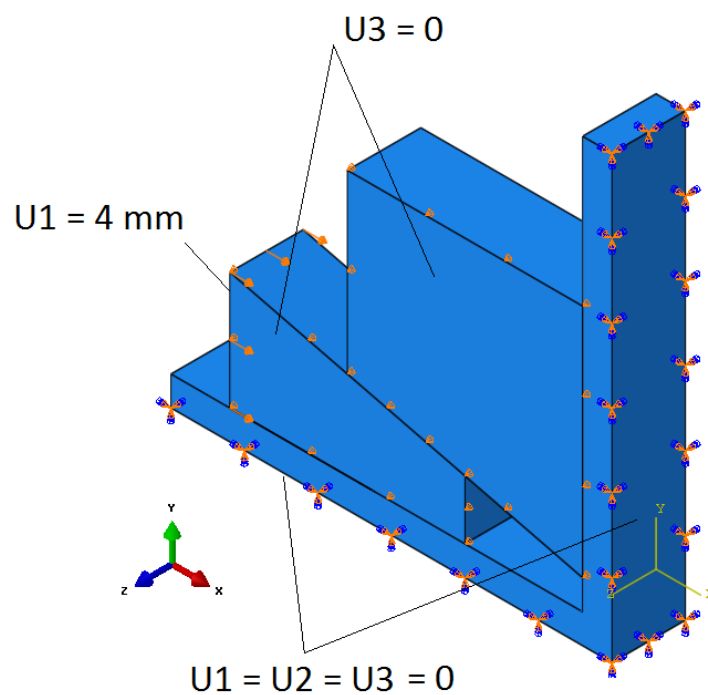
Prema slikama 28. i 29., horizontalnom pomaku klina od 4 mm u smjeru osi  $X$  odgovara vertikalni pomak bloka od 1 mm u smjeru osi  $Y$ .

Na slici 30. prikazan je odgovarajući računalni model u Abaqusu gdje su označene površine klina i bloka u kontaktu. Kontakt se također zadaje između klina i podloge te između bloka i vertikalnog zida, a kontakti se zadaju kako je opisano u poglavlju 4.2. Odabrana je *surface to surface* diskretizacija, *penalty* metoda *hard* kontakta te koeficijent trenja iznosa 0,3. Odabrana širina elemenata u modelu iznosi 2,5 mm.

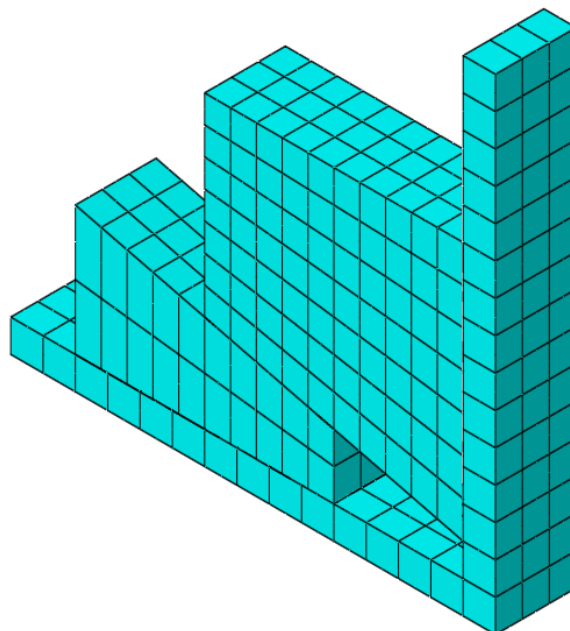


**Slika 30. Model u Abaqusu s označenim površinama klina i bloka u kontaktu**

Na slici 31. prikazani su zadani rubni uvjeti. Rubni uvjeti odnose se na koordinatni sustav prikazan na slici. Prema konvenciji u Abaqusu, koristit će se oznake  $U_1$ ,  $U_2$  i  $U_3$  za translacije u smjeru koordinatnih osi. Na element koji simulira podlogu i vertikalni zid zadano je uklještenje, na klin je nametnut pomak od 4 mm usmjeru osi  $X$ , a na označenim površinama klina i bloka ograničen je pomak u smjeru osi  $Z$  kako bi se osiguralo da se klin i blok gibaju u ravnini. Na slici 32. prikazana je korištena mreža C3D20R konačnih elemenata.



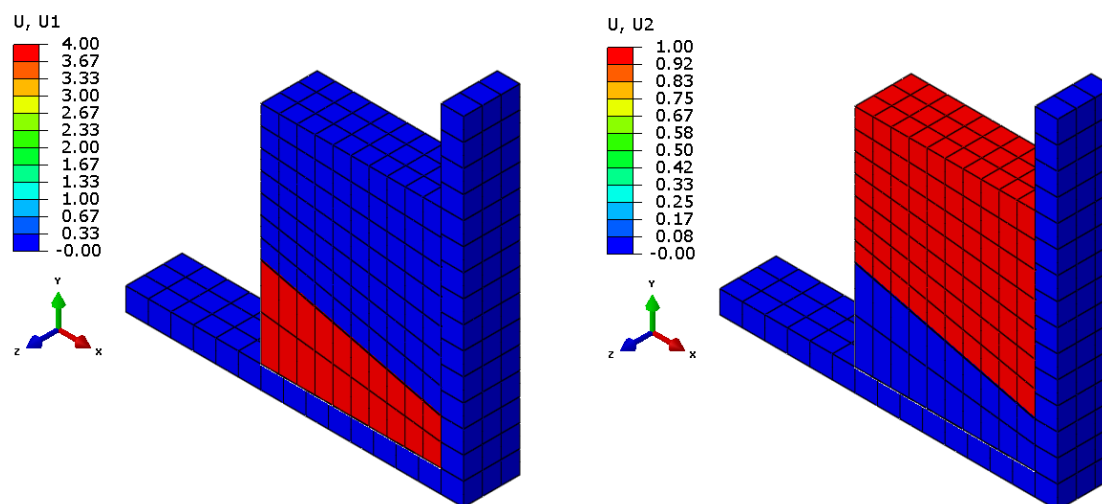
**Slika 31.** Rubni uvjeti za verifikacijski primjer - slučaj gibanja klina i bloka



**Slika 32.** Mreža konačnih elemenata za verifikacijski primjer (357 C3D20R elemenata)



Na slici 33. prikazani su rezultati analize. Lijevo su prikazani pomaci u smjeru osi  $X$ , a desno pomaci u smjeru osi  $Y$ . Može se vidjeti da pomak klina odgovara nametnutom pomaku i da se blok pomaknuo za 1 mm kao što je dobiveno geometrijskom analizom (slike 28. i 29.).

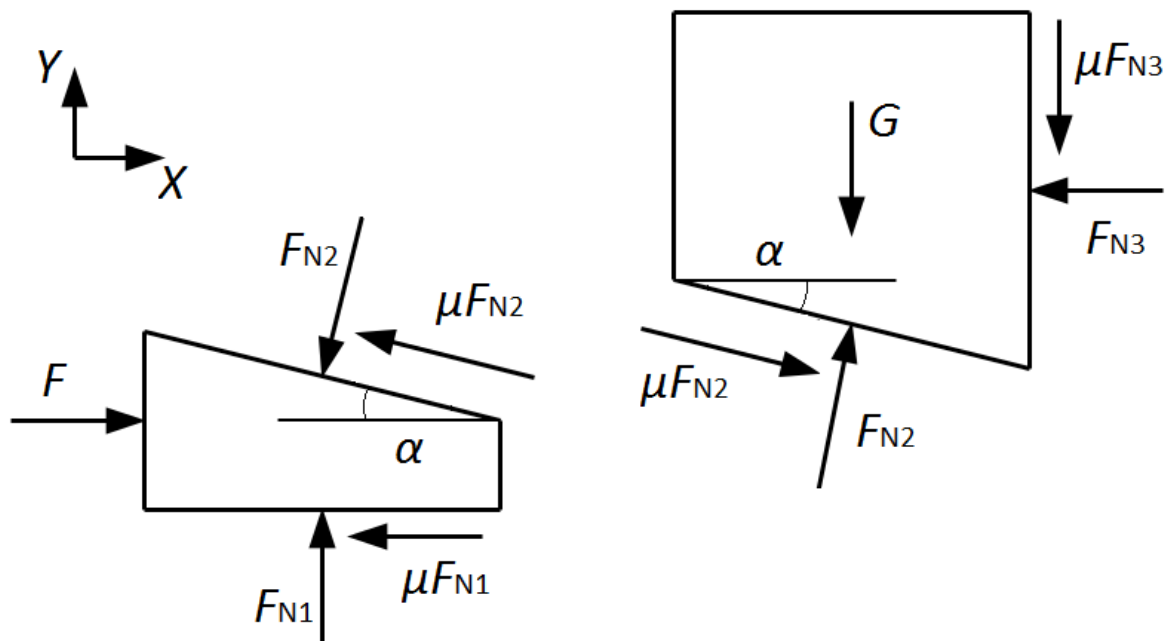


**Slika 33. Pomaci klina i bloka u smjeru osi  $X$  (lijevo) i u smjeru osi  $Y$  (desno) u mm**

Na ovom jednostavnom problemu pokazano je da se klinovi gibaju na očekivan način i da simulacija prolazi bez pogrešaka. Novi prst gripera radit će na sličnom principu i također će uključivati klizanje po kosinama. Iako se kod prsta gripera radi o znatno složenijoj geometriji, ovdje korištena metoda modeliranja kontakta može se na temelju pokazanog dobrog ponašanja kontakta koristiti i kod stvarnog problema.

#### **4.4.2. Drugi slučaj - stanje granične ravnoteže**

Razmotrit će se i slučaj granične ravnoteže sustava gdje će se provjeriti reakcijske sile na mjestima kontakta. Potrebno je naći maksimalni iznos sile  $F$  pri kojoj ne dolazi do gibanja klina i izračunati pripadne reakcije. Klin i blok s ucrtanim opterećenjem i reakcijama veza prikazani su na slici 34.



Slika 34. Klin i blok s ucrtanim opterećenjem i reakcijama veza

Uvjeti ravnoteže za klin glase:

$$\sum F_x = F - \mu F_{N1} - F_{N2} \sin \alpha - \mu F_{N2} \cos \alpha = 0, \quad (26)$$

$$\sum F_y = F_{N1} - F_{N2} \cos \alpha + \mu F_{N2} \sin \alpha = 0. \quad (27)$$

Uvjeti ravnoteže za blok glase:

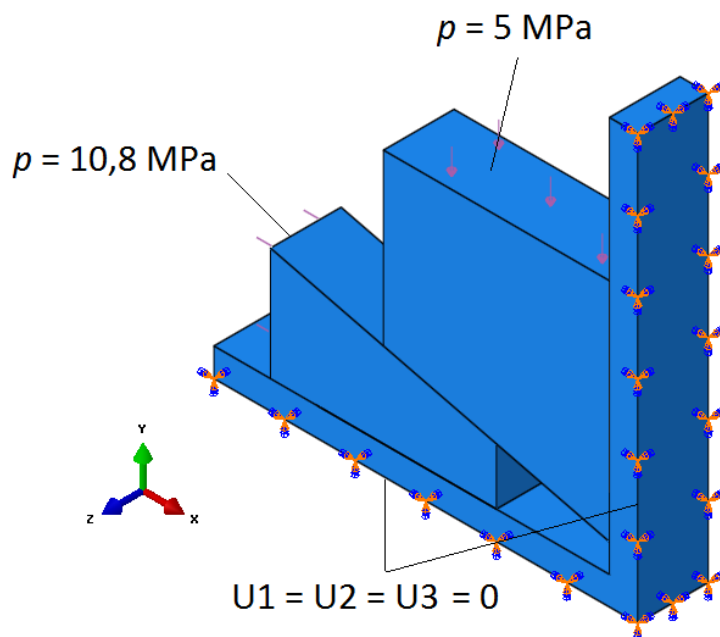
$$\sum F_x = F_{N2} \sin \alpha + \mu F_{N2} \cos \alpha - F_{N3} = 0, \quad (28)$$

$$\sum F_y = F_{N2} \cos \alpha - \mu F_{N2} \sin \alpha - G - \mu F_{N3} = 0. \quad (29)$$

Rješavanjem sustava jednačbi, uz  $G = 100 \text{ N}$ ,  $\alpha = 14,04^\circ$  i  $\mu = 0,3$ , dolazi se do nepoznate sile  $F$  i reakcija  $F_{N1}$ ,  $F_{N2}$  i  $F_{N3}$ :

$$\begin{aligned} F &= 108,73 \text{ N}, \\ F_{N1} &= 121,67 \text{ N}, \\ F_{N2} &= 135,53 \text{ N}, \\ F_{N3} &= 72,23 \text{ N}. \end{aligned} \quad (30)$$

Koristeći izračunatu silu  $F$ , problem će se riješiti i u Abaqusu. Na slici 35. prikazani su rubni uvjeti za ovaj slučaj. Uz uklještenje podloge i zida sada su zadani tlakovi koji odgovaraju sili  $F$  i težini  $G$ . Za prethodno prikazane dimenzije i širinu klina i bloka, tlak koji odgovara sili  $F$  iznosi 10,8 MPa, a tlak koji odgovara težini bloka  $G$  iznosi 5 MPa.



**Slika 35. Rubni uvjeti za verifikacijski primjer - slučaj granične ravnoteže**

Kreiranjem novog *History Outputa* u modulu *Step* te odabiranjem kontakta za domenu, moguće je odabrati izračunavanje traženih reakcijskih sila uslijed kontaktnog pritiska. U Abaqusu sile uslijed kontaktnog pritiska nose naziv CFN. Nakon provedene analize moguće je preko opcije *Create XY data - History Output* odabrati željeni kontakt i prikazati pripadnu reakcijsku silu po inkrementima. Dobiveni rezultati u usporedbi s analitičkim rješenjem prikazani su u tablici 1.

**Tablica 1. Iznosi reakcijskih sila za verifikacijski primjer dobiveni analitički i numerički u Abaqusu**

Reakcijska sila	Analitičko rješenje, N	Abaqus, N	Greška, %
$F_{N1}$	121,67	121,55	0,09867
$F_{N2}$	135,53	135,43	0,07381
$F_{N3}$	72,23	72,26	0,04152

Može se vidjeti da se rješenja dobivena analitički i numeričko rješenje u Abaqusu podudaraju i da su razlike zanemarive. Na temelju ovog primjera može se potvrditi da zadani kontakti u Abaqusu prenose sile na pravilan način.

Korištene metode modeliranja kontakta pokazale su dobre rezultate u oba slučaja verifikacijskog primjera. Stoga će se iste metode koristiti i kod modeliranja kontakta u analizi nove verzije prsta gripera.

## 5. DIZAJN I PRORAČUN NOVOG PRSTA GRIPERA

### 5.1. Opis zadatka

Zbog nedostataka postojeće verzije prsta gripera koji se sastoji od mehanizma s tri elementa te tako doprinosi opasnosti od izgubljenih dijelova unutar paogeneratora, provest će se dizajn i proračun nove verzije prsta gripera koji će se sastojati od jednog elementa. Takav dizajn u skladu je s konceptom isključenja stranih materijala (*foreign material exlussion*) koji se prakticira u nuklearnoj industriji i čijim se provođenjem nastoji preventirati ulazak stranih tijela u opasna područja, odnosno područja u kojima strana tijela predstavljaju financijski i sigurnosni rizik.

Potrebno je dakle dizajnirati prst gripera koji se sastoji od jednog elementa. Prst ne smije ulaziti u plastično područje, već u predviđenom broju ciklusa mora pozdano raditi i ostati u elastičnom području materijala. Prst gripera mora također biti lako izmjenjiv kako bi se isti griper mogao koristiti za cijevi različitih promjera. Prst koji će se analizirati u ovom radu predviđen je za zaključavanje u cijevi vanjskog promjera  $7/8"$ , odnosno 22,23 mm te unutarnjeg promjera  $19,68 \pm 0,15$  mm. Prema tome promjer prsta mora biti manji od unutarnjeg promjera cijevi, ali s druge strane promjer mora biti dovoljno velik da se za definirani hod trna omogući hvatanje na cijev.

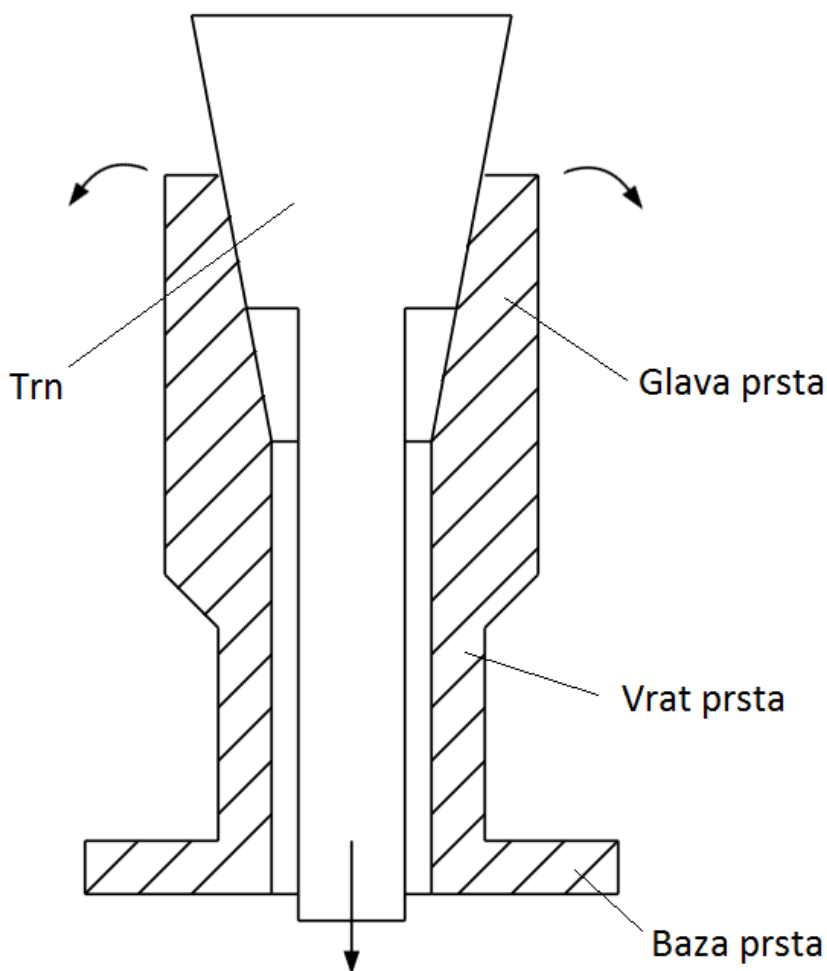
Prema slici 17., zaključavanje prsta unutar cijevi vrši se u zoni valjanja (*expansion zone*). To je zona s povećanim promjerom cijevi pa se tako uz istu silu zaključavanja ostvaruje manji pritisak na cijev. Potreban pritisak i zona u kojoj se novi prst gripera treba zaključati jednaki su kao kod postojeće verzije prsta, jer i jedna i druga verzija služe za ispitivanje jednakih parogeneratora.

Osim zaključavanja gripera kada je prst unutar cijevi, može se dogoditi da se griper zaključa u situaciji kada prst gripera nije unutar cijevi. Nova verzija prsta stoga mora biti izvedena tako da naprezanje i u tom slučaju ne prelazi granicu tečenja.

Novi dizajn prsta pokazat će se najprije konceptualno na skici. Zatim će se pokazati nova konstrukcija prsta i trna te će se na takvoj geometriji provesti numerički proračun koristeći teorijske principe i metode modeliranja objašnjenje u prethodnim poglavljima.

## 5.2. Prikaz novog dizajna

Na slici 36. prikazana je skica nove verzije prsta i trna gripera. Prikazana skica predstavlja temelj novog dizajna prsta.



Slika 36. Skica novog dizajna prsta i trna gripera

Prema slici, novu verziju prsta gripera možemo podijeliti na bazu, vrat i glavu prsta. Baza prsta vijčanim je spojem vezana za ostatak mehanizma za zaključavanje. Kod stare verzije prsta princip rada temeljio se na kosini, a taj princip zadržat će se i u novoj verziji. Pomicanjem trna vertikalno prema dolje glava prsta se radijalno širi i hvata na cijev. Nova verzija se za razliku od stare sastoji od samo jednog elementa koji je vezan za griper. Zbog takve izvedbe može se pojaviti značajno savijanje na spoju baze i vrata prsta. Stoga je potrebno pronaći oblik prsta za koji će naprezanja na tom području biti minimalna.

### 5.3. Razvoj novog prsta gripera

#### 5.3.1. Prva verzija novog prsta

Na temelju opisanih parametara koje prst mora zadovoljiti i provedene kinematske analize dolazi se do nove geometrije prsta i trna koja je prikazana na slici 37. Na slici lijevo prikazan je CAD model u izometriji, a na slici desno prikazan je model u presjeku.

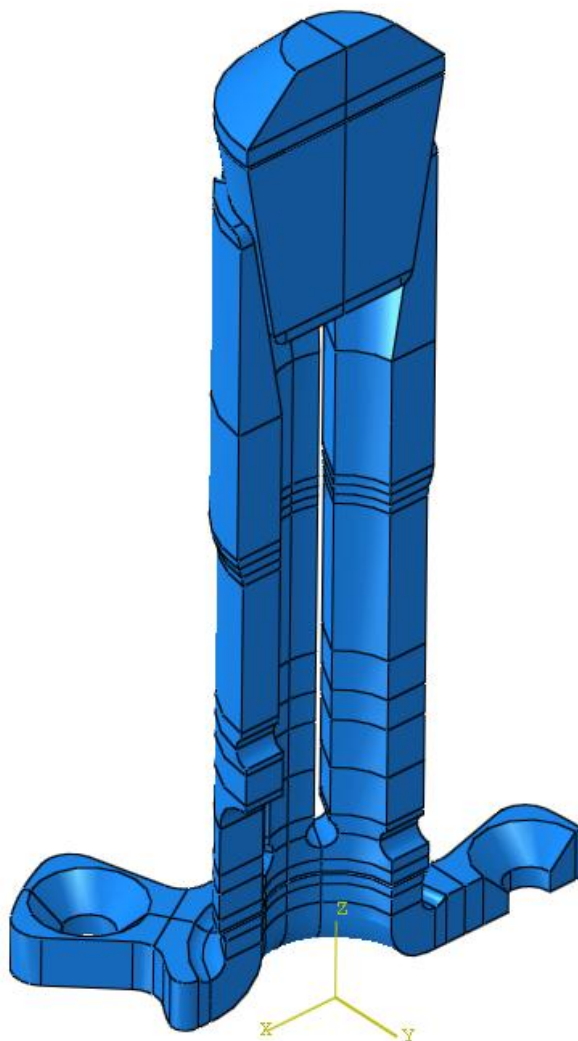


**Slika 37. Geometrija prsta i trna gripera (prva verzija nove izvedbe)**

Proces zaključavanja prsta analizirat će se u Abaqusu. Najprije je potrebno prikazanu geometriju prilagoditi za numerički proračun. Zanimarito će se mala skošenja i zaobljenja na prstu, a trn gripera pojednostavnit će se tako da će se zanemariti vijčane veze i dijelovi geometrije koje ne utječu na gibanje prsta.

### 5.3.1.1. Geometrija prsta u Abaqusu

Na slici 38. prikazana je geometrija prsta na kojoj će se provesti analiza. Može se vidjeti da je geometrija partitionirana, odnosno podijeljena, kako bi se omogućilo kreiranje kvalitetne mreže konačnih elemenata. Zbog simetričnosti geometrije i opterećenja, analiza će se provesti na polovici geometrije prsta i trna te će se zadati odgovarajući uvjeti simetrije.



**Slika 38. Geometrija prsta u Abaqusu (prva verzija nove izvedbe)**

### 5.3.1.2. Svojstva materijala

Predviđeni materijal za prst gripera je čelik za opruge 50CrV4, a za trn čelik X2CrNiMo18-14-3. Svojstva navedenih čelika koja su potrebna za definiranje analize dana su u tablici 2.

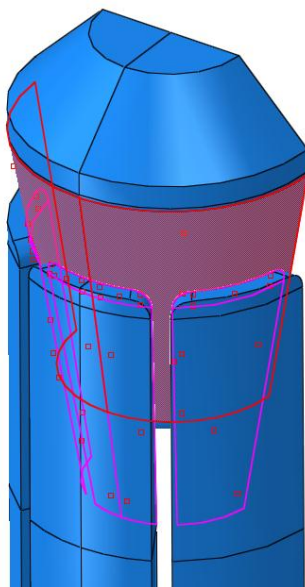


**Tablica 2. Svojstva čelika 50CrV4 i X2CrNiMo18-14-3**

	50CrV4	Tm - X2CrNiMo18-14-3
Modul elastičnosti, MPa	210000	195000
Poissonov faktor	0,3	0,3
Granica razvlačenja, MPa	900	190
Vlačna čvrstoća, MPa	1100	500

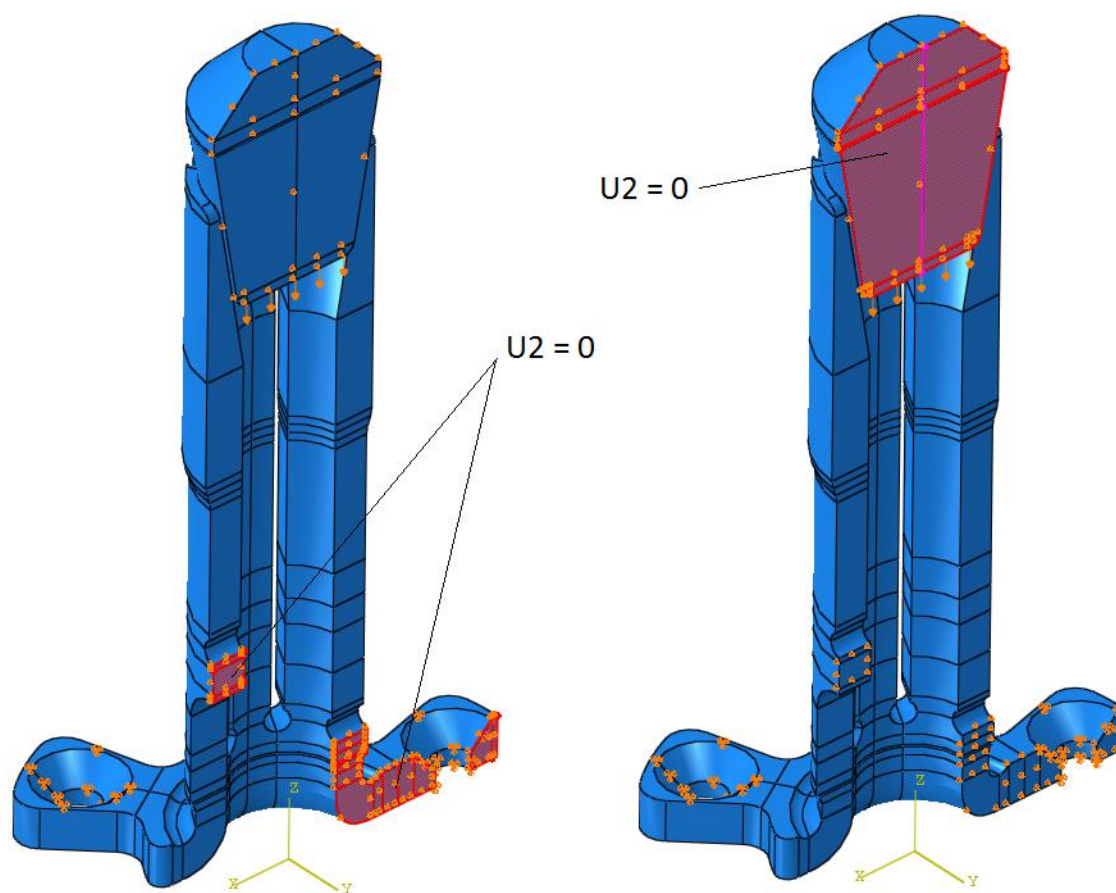
#### 5.3.1.3. Definiranje kontakta

Kontakt prsta i trna definira se na isti način kao u prethodno pokazanom verifikacijskom primjeru. Površina trna u kontaktu predstavlja *master* plohu, a površina prsta *slave* plohu. Definiran kontakt u Abaqusu prikazan je na slici 39.

**Slika 39. Kontakt prsta i trna gripera**

#### 5.3.1.4. Rubni uvjeti

Na slici 40. prikazani su nametnuti uvjeti simetrije prsta i trna. Rubni uvjeti odnose se na koordinatni sustav prikazan žutom bojom. Prema slici su na odgovarajućim površinama spriječeni pomaci u smjeru osi *Y* koji se prema konvenciji u Abaqusu označavaju s U2.



**Slika 40. Rubni uvjeti simetrije trna i prsta (prva verzija nove izvedbe)**

Osim uvjeta simetrije, na bazi prsta zadano je uklještenje, a na donju površinu trna nametnut je pomak od 5 mm. Naime, kako je objašnjeno u poglavlju 3.1.2, prilikom analize moguće je inkrementirati opterećenje ili pomak. Za ovaj slučaj kontakta pokazalo se da se inkrementiranjem pomaka dobiva stabilnija simulacija. Stoga se zadaje pomak trna od 5 mm koji prema geometriji prsta i trna odgovara pomaku potrebnom za zaključavanje u cijev.

#### 5.3.1.5. Mreža konačnih elemenata

Na slici 41. prikazana je mreža konačnih elemenata prsta i trna.

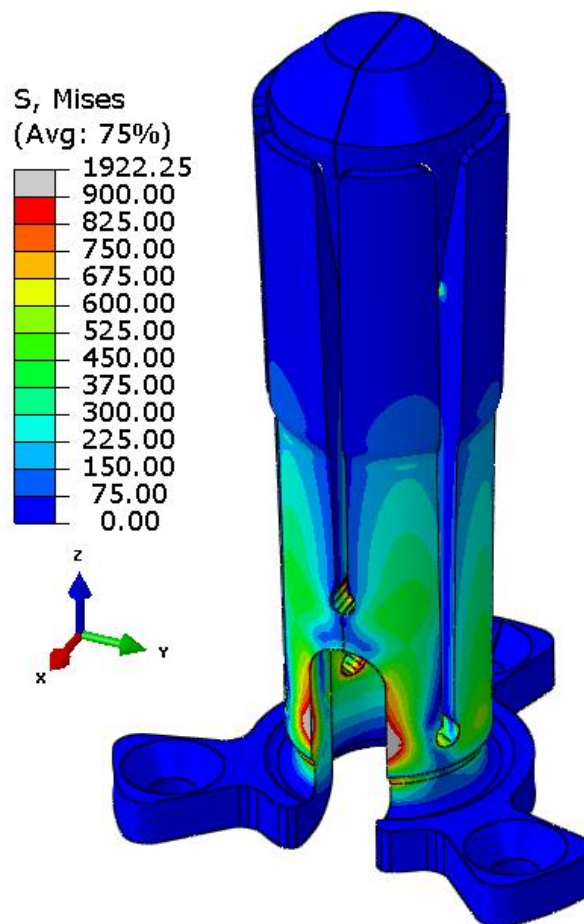


**Slika 41. Mreža konačnih elemenata prve verzije novog prsta (18192 C3D20R elementa)**

Particioniranjem geometrije i manipulacijom lokalne veličine elemenata dobivena je mreža s minimalnim brojem distordiranih elemenata. Distordiranost elementa može se općenito pokazati preko nekoliko različitih parametara. Koristeći parametre i vrijednosti tih parametara prema osnovnim postavkama u Abaqusu, postotak distordiranih elemenata u ovom slučaju je ispod 0,1 %. Kreirano je nekoliko različitih mreža pri čemu se provjeravala konvergencija rezultata te je na taj način dobivena mreža prema slici 41. za koju će se prikazati rezultati analize.

#### *5.3.1.6. Prikaz rezultata*

Na slici 42. prikazana je raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu u MPa za zadani pomak od 5 mm u analizi bez cijevi.

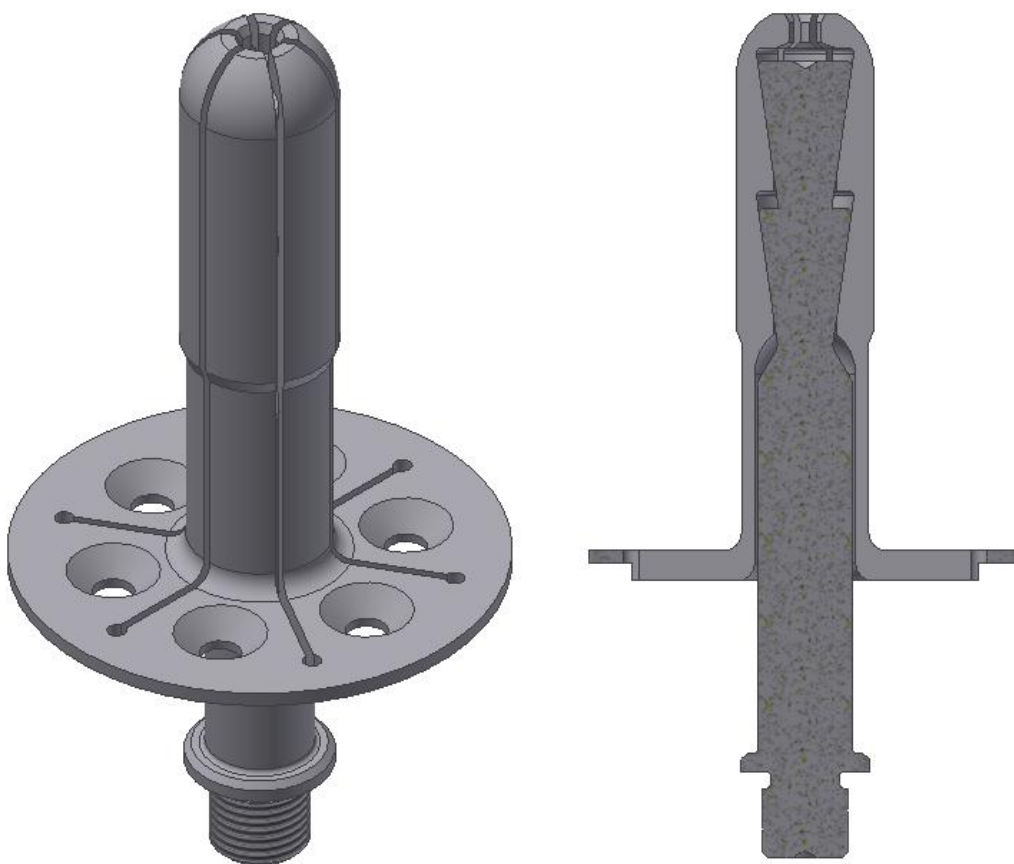


**Slika 42. Deformirani oblik prsta s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa (prva verzija nove izvedbe)**

Može se vidjeti da naprezanja na modelu prelaze granicu tečenja materijala. Najveći iznosi naprezanja javljaju se na mjestima oštih rubova na modelu. Na takvim mjestima moguće su pojave singularnosti te se ta područja u globalnoj slici naprezanja mogu zanemariti. Međutim, ako se i zanemare te vrijednosti, naprezanja na kritičnom presjeku još uvijek su iznad granice tečenja materijala. Ova verzija novog dizajna prsta izrađena je i ispitana u laboratoriju tvrtke Inetec te se nije pokazala dobrom. Stoga je prst potrebno oblikovati na drugi način.

### **5.3.2. Druga verzija novog prsta**

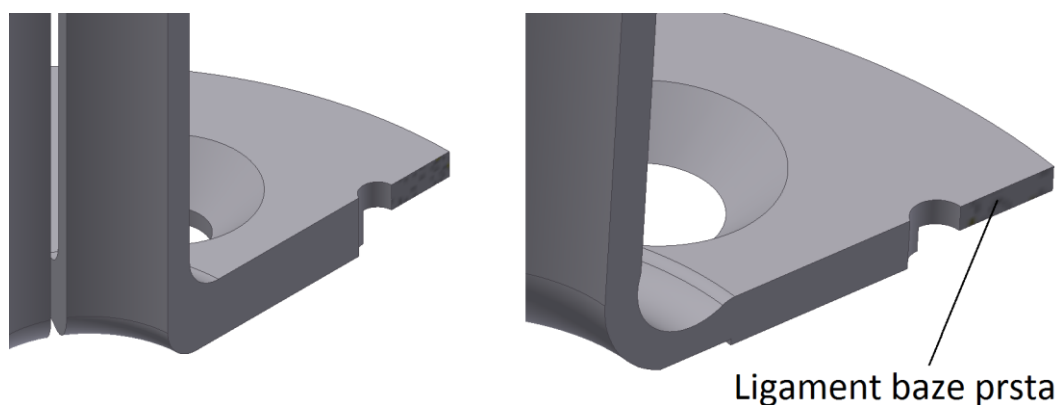
Na temelju rezultata numeričkih analiza i eksperimentalnih ispitivanja prethodno pokazanog dizajna novog prsta, krenulo se u oblikovanje druge verzije novog prsta. Druga verzija novog dizajna prikazana je na slici 43.



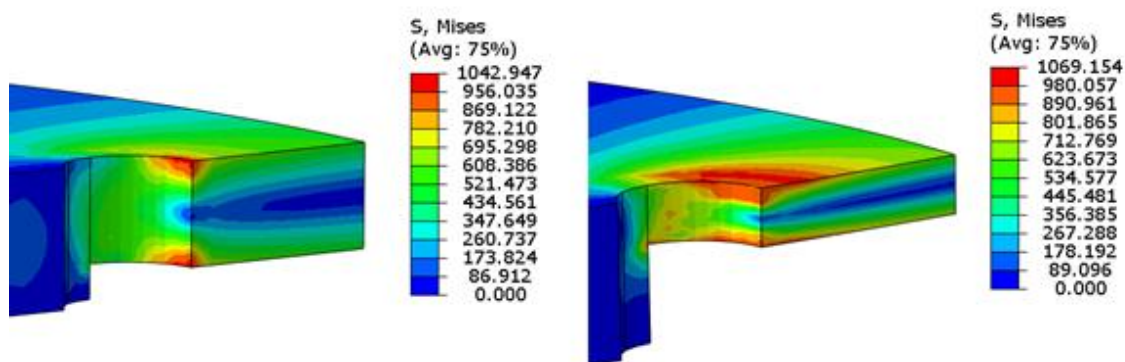
**Slika 43. Geometrija prsta i trna gripera (druga verzija nove izvedbe)**

Može se vidjeti da se u ovoj verziji zadržao sličan koncept kosine, no u ovom slučaju trn i prst dolaze u kontakt preko dvije kosine. Na taj način osigurava se ravnomjernija raspodjela pritiska prilikom zaključavanja na cijev.

Numerička analiza ove verzije pokazala je bolje rezultate od prethodne verzije. Naprezanja na spoju baze i vrata prsta svela su se na prihvatljiv iznos, no pojavila su se velika naprezanja na drugim područjima na bazi prsta. Stoga je na ovoj verziji prsta provedeno nekoliko izmjena geometrije. Te izmjene bile su usmjerene rezultatima numeričkog proračuna za pojedinu verziju. Na slici 44. prikazani su neki od različitih izvedbi spoja baze i vrata prsta, a na slici 45. mjesta koncentracije naprezanja za različite debljine baze prsta.



Slika 44. Različite izvedbe spoja baze i vrata prsta



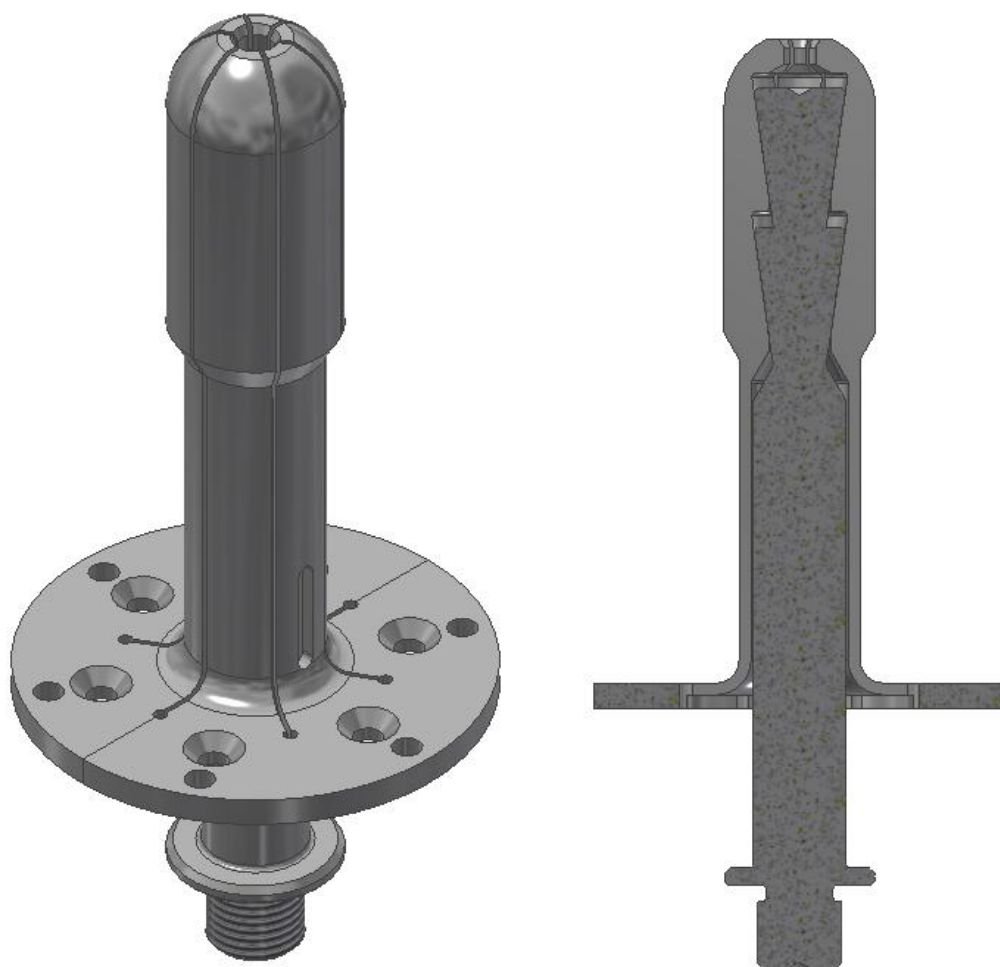
Slika 45. Prikaz koncentracije naprezanja za različite debljine ligamenta baze prsta, MPa

Dodatnim oblikovanjem geometrije te provođenjem dodatnih analiza došlo se do verzije prsta s prihvatljivim iznosima naprezanja na cijelom modelu. U nastavku će se za tu verziju prikazati tijek proračuna i rezultati analiza.

### 5.3.3. Konačna verzija novog prsta

Provođenjem analiza na različitim modificiranim izvedbama druge verzije novog prsta došlo se do konačne verzije novog prsta. Geometrija konačne verzije novog prsta i trna prikazana je na slici 46.



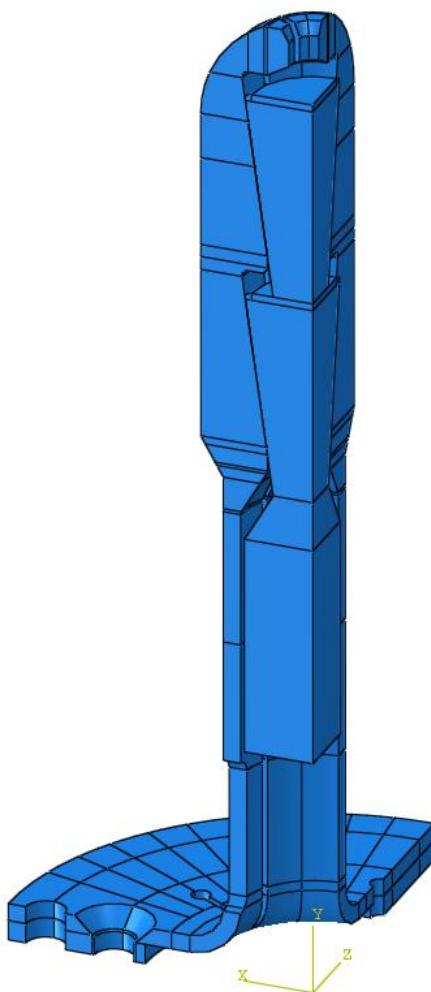


**Slika 46. Geometrija prsta i trna gripera (konačna verzija nove izvedbe)**

Konačna verzija novog prsta predstavlja modificirani oblik druge verzije prsta prikazane na slici 43. Zbog tehnologije izrade unutarnjih konusa, ova verzija prsta izradit će se iz dva dijela, odnosno prst će se u toku izrade prepiliti na pola. Spajanjem dvaju identičnih dijelova vijčanom vezom na griper, prst će se ponašati kao jedan element. Stoga takav način izrade i montaže na griper nije u suprotnosti s osnovnom idejom dizajniranja prsta kao jednog elementa.

#### 5.3.3.1. Geometrija prsta u Abaqusu

Na slici 47. prikazana je particionirana geometrija prsta i trna koja će se koristiti za numerički proračun.



**Slika 47. Geometrija prsta u Abaqusu (konačna verzija nove izvedbe)**

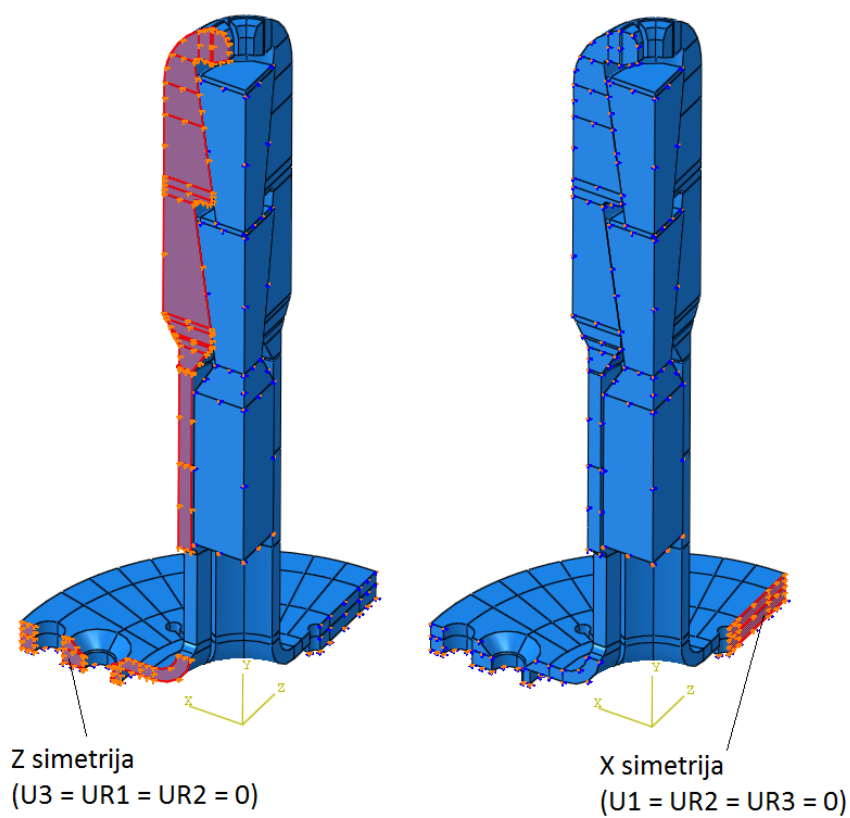
Ova verzija prsta dvostruko je simetrična pa se analiza može provesti na jednoj četvrtini geometrije. Na slici je prikazan i koordinatni sustav na koji će se odnositi svi rubni uvjeti i rezultati analize.

Materijalna svojstva i način zadavanja kontakta analogni su prethodno pokazanoj prvoj verziji novog prsta.

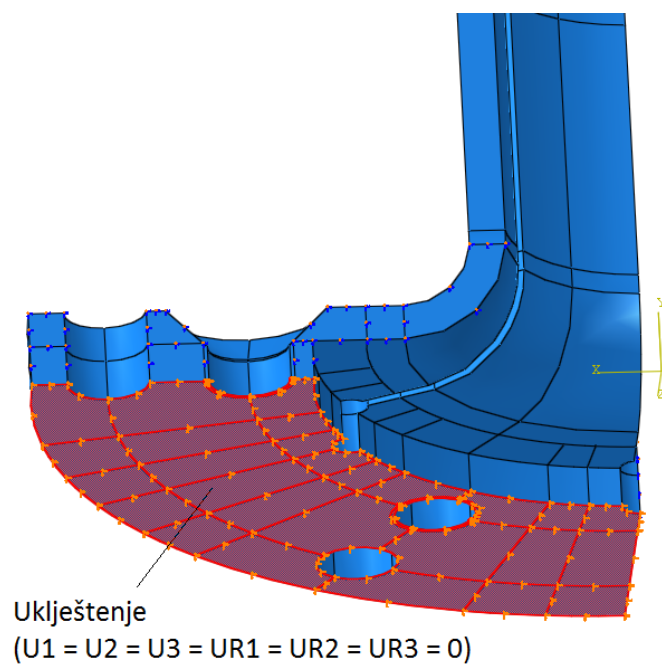
#### 5.3.3.2. Rubni uvjeti

Na slikama 48. i 49. prikazani su zadani rubni uvjeti.





**Slika 48.** Rubni uvjeti simetrije trna i prsta (konačna verzija nove izvedbe)

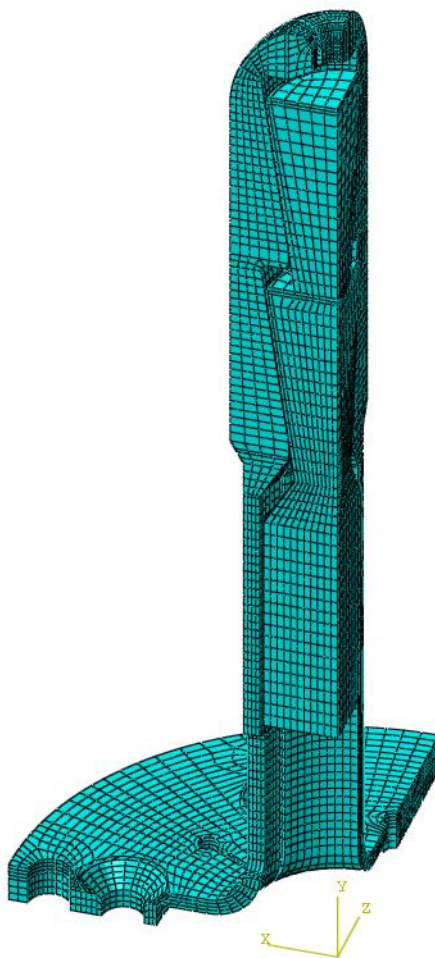


**Slika 49.** Uklještenje baze prsta

Na slici 48. označeni su samo rubni uvjeti simetrije prsta, no podrazumijeva se da se rubni uvjeti simetrije zadaju i za trn. Osim prikazanih rubnih uvjeta zadaje se analogno prethodnim verzijama vertikalni pomak trna od 5 mm.

#### 5.3.3.3. Mreža konačnih elemenata

Na slici 50. prikazana je mreža konačnih elemenata za konačnu verziju prsta.



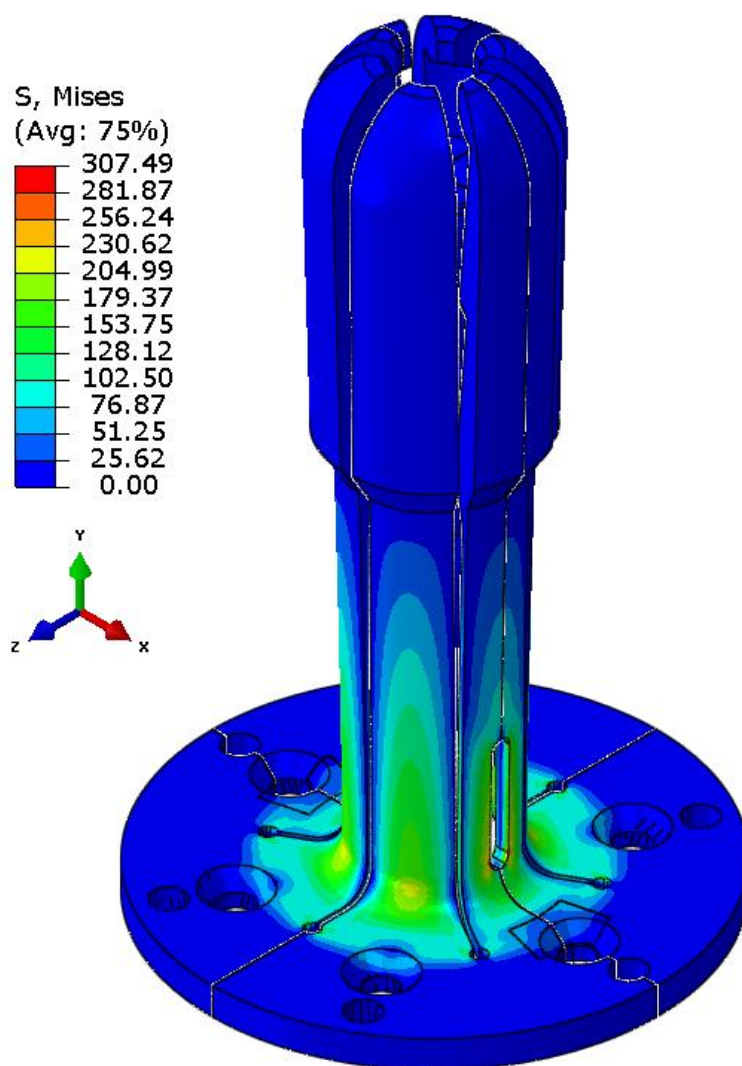
**Slika 50. Mreža konačnih elemenata konačne verzije novog prsta (14773 C3D20R elementa)**

Mreža se sastoji od 14773 C3D20R elemenata. Kao i u prethodnim verzijama, posebna pažnja posvetila se kreiranju kvalitetne mreže na kritičnom području, odnosno na spoju baze i vrata prsta te na mjestima kontakta. Partitioniranjem geometrije i manipulacijom lokalne veličine elemenata postigla se strukturirana mreža na cijelom modelu.

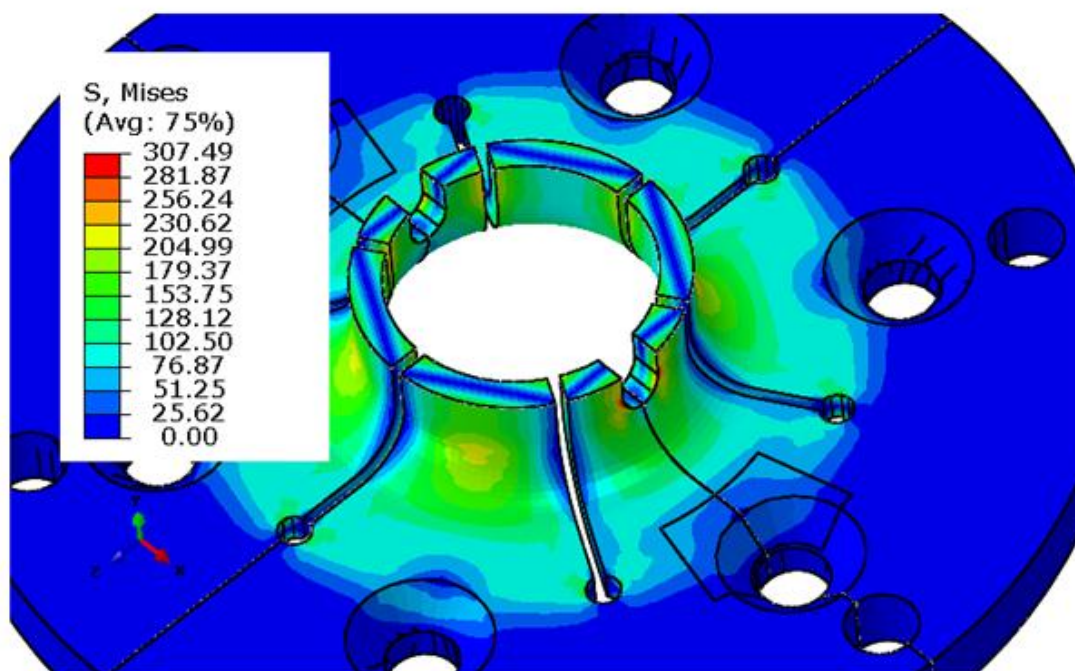
#### 5.3.3.4. Prikaz rezultata

Pokazat će se rezultati za anлізу bez cijevi i za analizu s uključenom cijevi u model. U slučaju analize s cijevi potrebno je zadati dodatni kontakt između vanjske površine prsta i unutarnje stijenke cijevi.

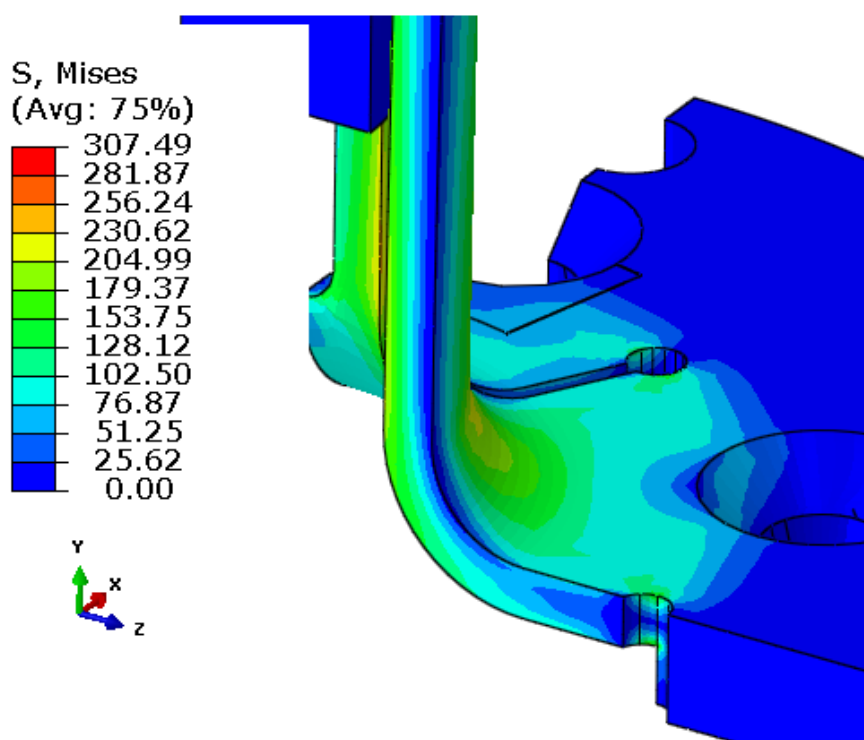
Na slikama 51. do 53. prikazani su rezultati analize bez cijevi.



**Slika 51. Deformirani oblik prsta s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa za analizu bez cijevi (konačna verzija nove izvedbe)**



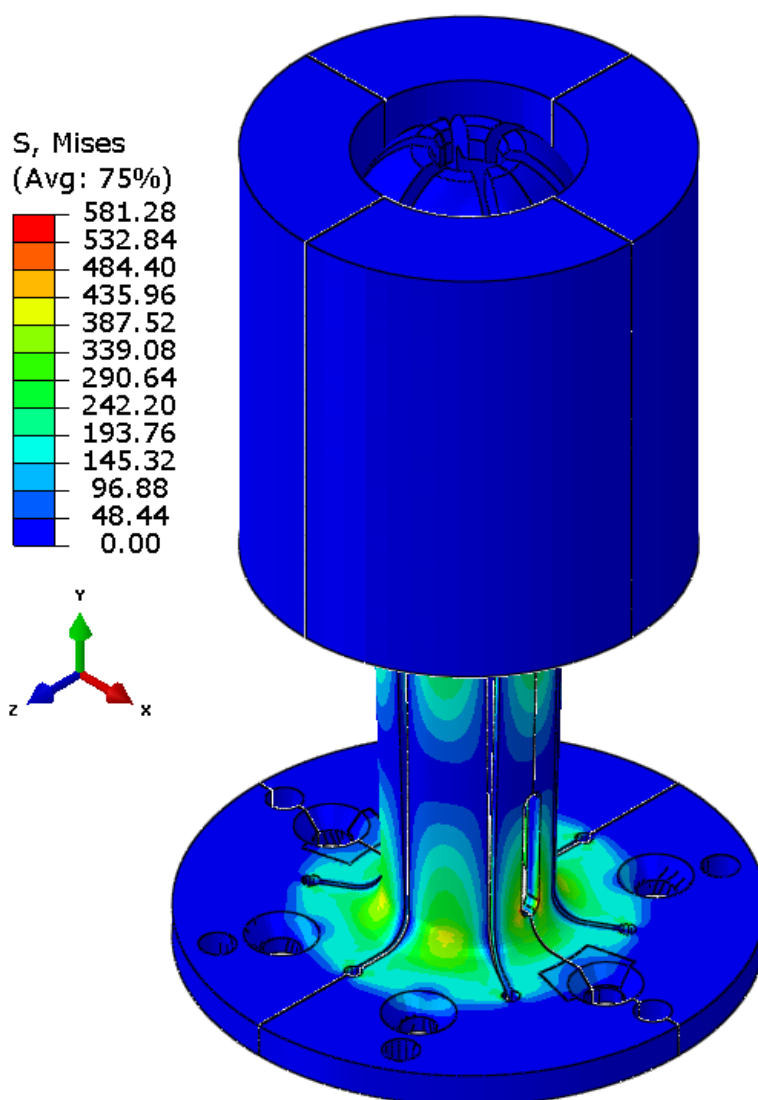
Slika 52. Naprezanja prema von Misesu u MPa na kritičnom presjeku prsta (analiza bez cijevi)



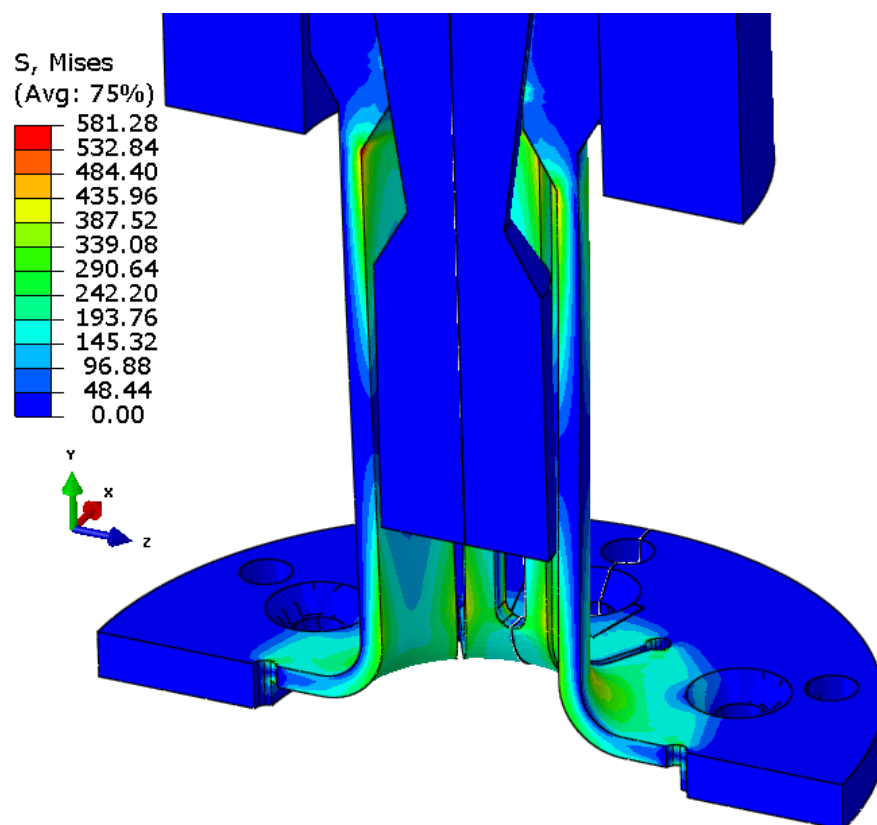
Slika 53. Detalj prsta s prikazanim naprezanjima prema von Misesu u MPa (analiza bez cijevi)

Može se vidjeti da su naprezanja na cijelom području prsta daleko ispod granica tečenja.

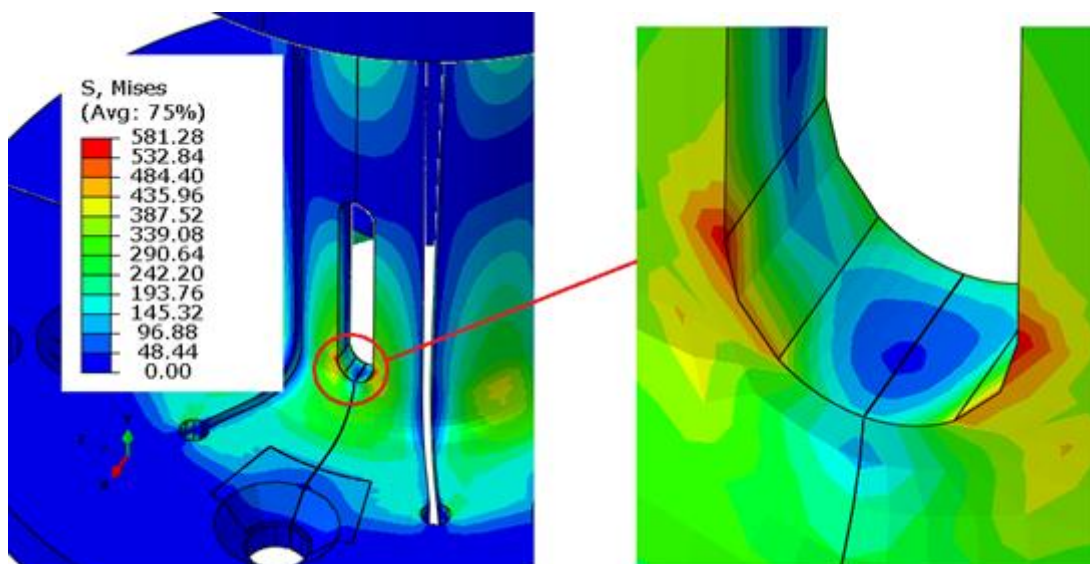
Na slikama 54. do 57. prikazani su rezultati za analizu sa cijevi.



**Slika 54.** Deformirani oblik prsta s prikazanim ekvivalentnim naprezanjima prema von Misesu u MPa za analizu sa cijevi (konačna verzija nove izvedbe)



Slika 55. Detalj prsta s prikazanim naprežanjima prema von Misesu u MPa (analiza sa cijevi)

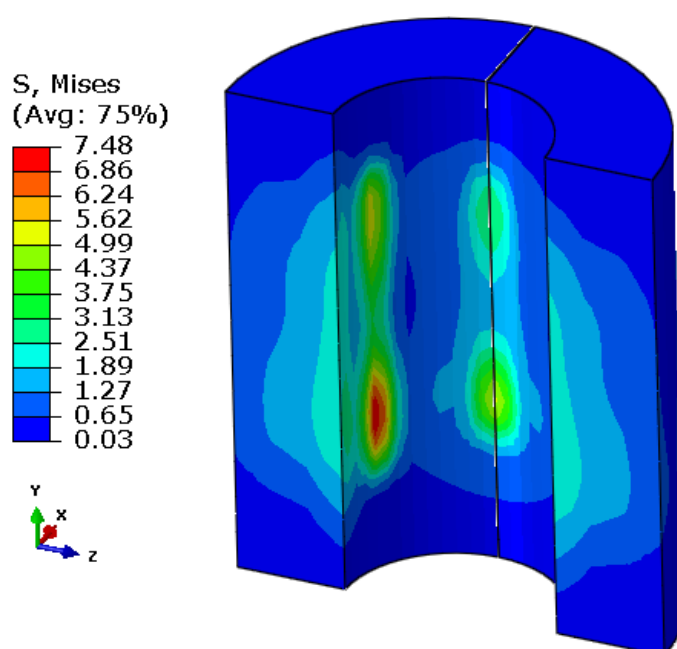


Slika 56. Prikaz područja koncentracije naprežanja



Na slici 56. prikazano je područje koncentracije naprezanja na prstu. To je područje s oštrim rubovima na kritičnom presjeku te je na takvim mjestima očekivana pojava povećanih naprezanja. Promatranjem naprezanja na širem području modela može se vidjeti da su naprezanja na kritičnom presjeku ustaljena i nižeg iznosa nego na tom mjestu.

Na slici 57. prikazano je naprezanje na cijevi uslijed kontaktnog pritiska prilikom zaključavanja prsta. Vrijednosti naprezanja u skladu su s očekivanjima te ne uzrokuju oštećenja na cijevi.



**Slika 57. Cijev s prikazanim ekvivalentnim napreznjima prema von Misesu u MPa uslijed pritiska prsta u procesu zaključavanja za cijev**

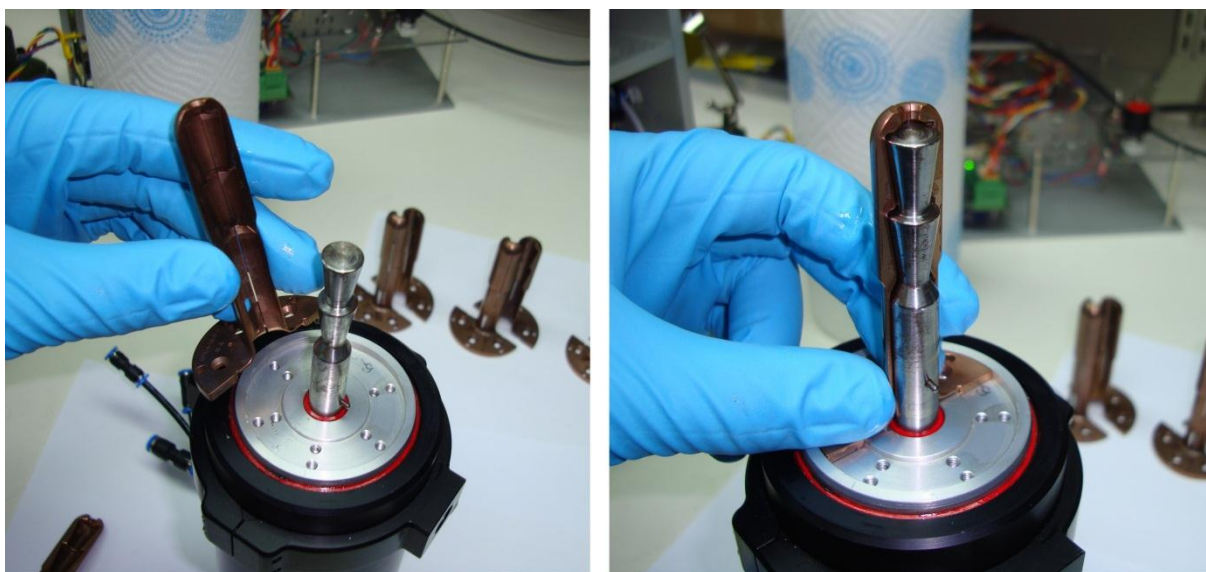
Numerička analiza ove verzije prsta dala je dobre rezultate na cijelom području modela. Na temelju tih rezultata, prst i trn gripera pušteni su u izradu te zatim testirani u laboratoriju tvrtke Inetec.

## 6. TESTIRANJE NOVOG PRSTA GRIPERA

Konačna verzija novog dizajna koja je pokazala dobre rezultate u numeričkom proračunu izrađena je te površinski obrađena procesom karbonitriranja. Na slici 58. prikazani su izrađeni prsti. Kako Forerunner ima dvije osi sa po dva gripera (poglavlje 2.), potrebno je izraditi četiri prsta. Također se može vidjeti da se prsti zbog tehnološke obrade unutarnjih konusa izrađuju iz dva dijela. Kao što je opisano u prethodnom poglavlju, nakon montaže na griper, prst se može razmatrati kao jedan element. Montaža prsta na griper prikazana je na slici 59.



Slika 58. Izrađeni set prstiju gripera za Forerunner

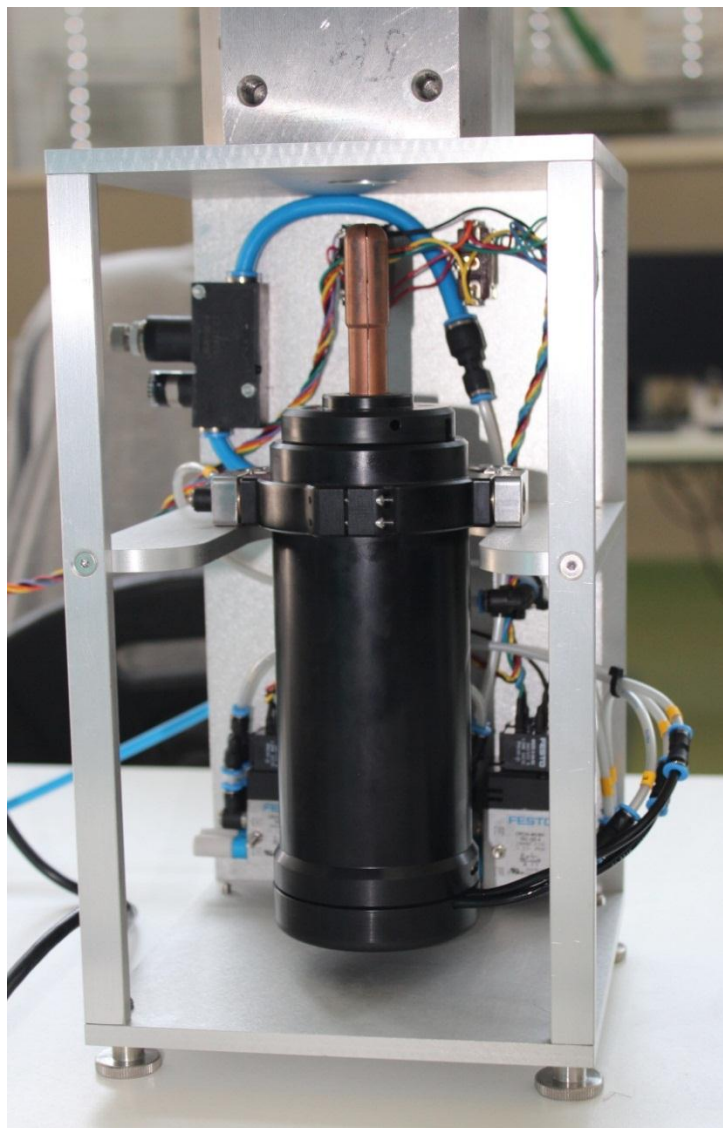


Slika 59. Montaža prsta na griper



### 6.1. Konstrukcija okvira za ispitivanje gripera

Nakon montaže prsta na griper, potrebno je provesti testiranje. U sklopu ovog rada provedeno je konstruiranje posebnog okvira koji će služiti za testiranje gripera. Okvir je prikazan na slici 60.



**Slika 60. Prikaz gripera s novim prstom u okviru za testiranje**

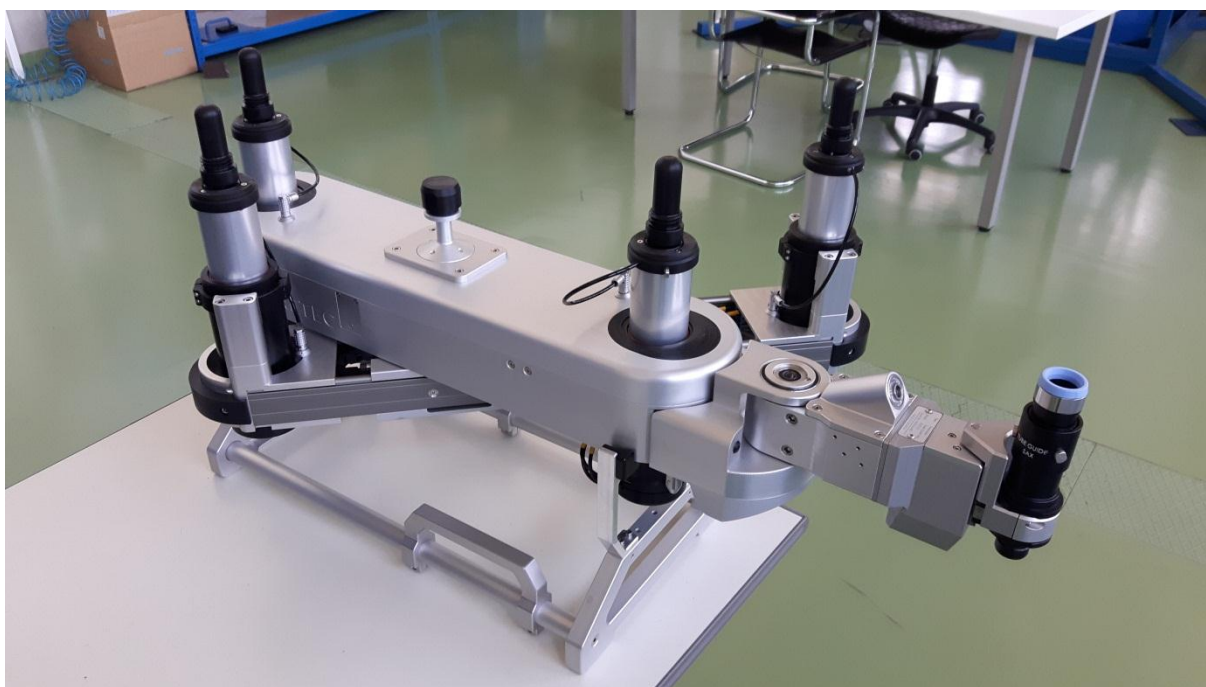
Na središnjoj ploči okvira montira se griper s jednakim nosačima kao na Forerunneru. Na gornjoj ploči okvira postavljen je blok s kružnim otvorom koji simulira cijev. Griperi se testiraju pojedinačno te se upravljaju pomoću pripadne elektronike i pneumatike.

## 6.2. Rezultati ispitivanja

Prsti gripera ispitani su na 200 000 ciklusa zaključavanja i otključavanja. Osim testiranja prsta na okviru za testiranje, provjerena je funkcionalnost prsta u uvjetima kada se Forerunner giba po maketi cijevne stijene, što simulira rad u realnim uvjetima.

Na temelju vizualne inspekcije i *eddy current* ispitivanja zaključuje se da novi dizajn prsta gripera radi pouzdano i ne uzrokuje oštećenja na cijev.

Ranije je spomenuto da prst mora izdržati i zaključavanje u slučaju da se ne nalazi unutar cijevi. Numerikom i eksperimentom potvrđeno je da prst može izdržati zaključavanje bez cijevi, no kada manipulator nije u radnom stanju, odnosno kada nema dovoda zraka, griperi ostaju duže vrijeme u zaključanom stanju pa se u cilju produljenja životnog vijeka na prste stavljaju zaštitne kapice. Forerunner sa zaštitnim kapticama na prstima gripera prikazan je na slici 61.



Slika 61. Forerunner sa zaštitnim kapticama na prstima gripera

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je razviti novi prst gripera koji će se sastojati od jednog elementa i koji će zadovoljavati sve zahtjeve za pouzdano i sigurno ispitivanje cijevi parogeneratora.

U prva dva poglavlja objašnjeni su osnovni pojmovi potrebni za razumijevanje problema. Prikazani su parogeneratori nuklearnih elektrana i uređaji za njihovo ispitivanje. Objašnjen je princip na kojemu Forerunner obavlja ispitivanje i problemi koji se mogu pojaviti zbog dizajna stare verzije prsta. Razumijevanje principa rada i vanjskih uvjeta kojima će prst biti izložen tijekom eksploatacije nužno je za postavljanje adekvatnog numeričkog modela.

U trećem poglavlju prikazani su osnovni teorijski principi nelinearne analize i definiranja kontakta. Izvedena je jednačba krutosti za inkrementalni pomak, prikazani su osnovni izrazi teorije elastičnosti koji se koriste u izvodu konačnog elementa i objašnjen je Newton - Raphsonov iteracijski postupak koji se primjenjuje u Abaqusu. Na taj način dao se uvid u inkrementalno - iterativne metode koje se koriste za opisivanje nelinearnog odziva konstrukcija. Poznavanje teorijskih principa na kojima se temelje numeričke analize preduvjet je za pravilno definiranje i razumijevanje tijeka analize. Poznavanje teorije također može pomoći u kritičkom razmatranju dobivenih rješenja i bržem pronalasku eventualnih grešaka analize. Osim za razumijevanje numeričkog proračuna, izlaganje teorije i postupka definiranja kontakta u Abaqusu smatrano je svrsishodnim za naknadno referenciranje kod verifikacijskog primjera i proračuna prsta.

Kod numeričke analize složenih problema potrebno je korištene konačne elemente i metode modeliranja najprije verificirati na jednostavnijem problemu za koji je poznato analitičko rješenje. U ovom slučaju odabran je primjer klizanja bloka po vertikalnom zidu uslijed utiskivanja klina. Razmotren je slučaj gibanja klina i bloka te stanje granične ravnoteže gdje su provjerene reakcijske sile uslijed kontakta tijela. U oba razmotrena slučaja korištena metoda definiranja kontakta pokazala je dobre rezultate te se na isti način pristupilo modeliranju kontakta na stvarnom problemu.

Na temelju ulaznih parametara i zahtjeva koje prst mora zadovoljiti, u suradnji s tvrtkom Inetec koncipirana je nova verzija prsta gripera. Provođenjem numeričkog proračuna te izradom i testiranjem novog prsta pokazalo se da su naprezanja prevelika te da je potrebno oblikovati prst na drugačiji način. Koncipirana je druga verzija novog prsta koja je pokazala bolje rezultate, ali s određenim problematičnim mjestima na geometriji. Ta verzija postala je

temelj za daljnje analize. U numeričkim analizama u Abaqusu pokazalo se da za ovaj problem najstabilniju simulaciju i najbolje rezultate daje *surface to surface* diskretizacija kontakta sa *penalty* metodom definiranja *hard* kontakta. Također se pokazalo da je simulacija stabilnija u slučaju inkrementiranja pomaka nego u slučaju inkrementiranja sile. Ti zaključci doneseni su na temelju promatranja trenutnih inkremenata i broja iteracija potrebnih za postizanje ravnoteže u pojedinom inkrementu analize, kao i na temelju dobivenih krajnjih rezultata analiza. Modificiranjem geometrije i provođenjem dodatnih analiza došlo se do verzije novog prsta sa zadovoljavajućim iznosima naprezanja na cijelom području modela.

Konačna verzija novog prsta izrađena je i testirana u laboratoriju tvrtke Inetec. Prst se zbog složene geometrije i obrade unutarnjih konusa izrađuje iz dva identična dijela. Nakon montiranja tih dijelova na griper, prst se ponaša kao jedan element jer nema dodatnih dijelova koji bi se mogli odvojiti tijekom zaključavanja u cijev parogeneratora. Stoga takav način izrade nije u suprotnosti s osnovnom idejom dizajniranja prsta kao jednog elementa. Novi prst testiran je na posebno konstruiranom okviru za testiranje gripera, kao i u radnim uvjetima manipulatora na maketi cijevne stijene parogeneratora. U svim provedenim ispitivanjima novi prst gripera pokazao se ispravnim i pouzdanim.

Tijekom razvoja novog prsta proveden je velik broj iteracija s različitim modifikacijama na geometriji koje se zbog opširnosti nisu sve prikazale u okviru ovog rada. Proces konstruiranja i modificiranja geometrije bio je pri tome usmjeren rezultatima numeričkih analiza. Kroz ovaj zadatak pokazano je na taj način da se praktičnom primjenom računalnih simulacija može smanjiti broj proizvedenih prototipova i tako ubrzati i usmjeriti proces razvoja novog proizvoda.

## LITERATURA

- [1] <https://www.iaea.org/pris/>
- [2] Nuclear Technology Review 2013, IAEA, 2013.
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_power\\_plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_plant)
- [4] <https://hr.wikipedia.org/wiki/PWR>
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling\\_water\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling_water_reactor)
- [6] <http://allthingsnuclear.org>
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/VVER>
- [8] <http://www.asminternational.org>
- [9] <http://www.gobizkorea.com>
- [10] <http://www.elliott-tool.com>
- [11] <http://www.inetec.hr/en/>
- [12] <http://us.areva.com>
- [13] <http://www.bwxt.com>
- [14] <https://online.platts.com>
- [15] K. J. Karwoski, Circumferential Cracking of Steam Generator Tubes, 1997.
- [16] Sorić, J., Podloge za predavanja iz kolegija „Nelinearna numerička analiza konstrukcija“
- [17] <http://nptel.ac.in>
- [18] Sorić, J., Metoda konačnih elemenata, Golden marketing, Zagreb, 2004.
- [19] Abaqus Analysis User's Manual
- [20] Tonković, Z., Podloge za predavanja iz kolegija „Numerička analiza konstrukcija“
- [21] <http://web.mit.edu>

Navedenim linkovima zadnji put je pristupljeno 25.11.2016.